



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

METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SECUENCIA DE EXPLOTACIÓN DE  
BANCOS MEDIANTE EL USO DE SISTEMAS FULLY MOBILE IN-PIT SIZER AND  
CONVEYOR

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

JOSUÉ DAVID GONZÁLEZ CORONEL

PROFESOR GUÍA:  
NELSON MORALES VARELA

PROFESOR CO-GUÍA:  
ENRIQUE JÉLVEZ MONTENEGRO

MIEMBROS DE COMISIÓN:  
MANUEL REYES JARA  
WALTER LOLI MORALES

SANTIAGO DE CHILE  
2020

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: MAGÍSTER EN MINERÍA  
POR: JOSUÉ GONZÁLEZ CORONEL  
FECHA: MARZO DE 2020  
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

**METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SECUENCIA DE  
EXPLOTACIÓN DE BANCOS MEDIANTE EL USO DE SISTEMAS FULLY  
MOBILE IN-PIT SIZER AND CONVEYOR**

Los sistemas de correas y chancadores interior pit (IPCC, por sus siglas en inglés), han recibido un creciente interés dentro de la industria minera debido a la reducción en los costos operativos, menor requerimiento en combustible y mano de obra, y menor impacto ambiental comparado a las operaciones tradicionales con pala-camión. Sin embargo, contrariamente a los sistemas tradicionales, no existe una metodología establecida para la planificación de operaciones mediante IPCC y, en particular, para evaluar la secuencia óptima de explotación.

En este trabajo, se propone una metodología para evaluar la aplicación y rendimiento de un sistema de correas súper-portables y un chancador móvil tipo *sizer* al interior del pit (FMIPSC). El sistema FMIPSC es modelado usando simulación de eventos discretos para estimar su utilización, disponibilidad, rendimiento y la interferencia con las operaciones de perforación y tronadura. Se analizan diferentes métodos de carguío (retroceso, conducción y chancador fijo) y secuencias de explotación (longitudinales y transversales). Posteriormente, un modelo de optimización, basado en programación lineal entera mixta, se ejecuta para generar el agendamiento de la producción siguiendo secuencias de extracción selectivas de orientación mixta que combinan secuencias longitudinales y transversales al banco.

De acuerdo con los resultados de los experimentos realizados, los métodos de carguío en conducción son los más productivos. A su vez, las mejores opciones para el carguío en zonas de desarrollo son los métodos con chancador fijo y en retroceso, dependiendo del tamaño del banco y orientación de la explotación. Los resultados muestran que las secuencias de orientación mixta entregadas por el modelo de optimización permiten mejorar la selectividad sin afectar mayormente los índices operacionales del sistema.

En conclusión, la metodología propuesta puede ser implementada para analizar el comportamiento de los sistemas FMIPSC y optimizar su rendimiento, al implementar métodos de carguío que maximizan la productividad y combinándolos en secuencias de explotación que favorezcan la selectividad.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN  
THE GRADE: MASTER IN MINING ENGINEERING  
BY: JOSUÉ GONZÁLEZ CORONEL  
DATE: MARCH 2020  
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

**OPTIMIZATION METHODOLOGY FOR BENCH-MINING SEQUENCES USING  
FULLY MOBILE IN-PIT SIZER AND CONVEYOR SYSTEMS**

In-Pit Crusher and Conveyor Systems (IPCC) have received an increasing interest in the mining industry due to the reduction in haulage costs, lower personnel and fuel requirements, and less environmental impact in comparison with traditional truck-shovel operations. However, contrarily to the usual shovel-truck case, there is not a well-established methodology for planning IPCC extractions and, in particular to analyze the optimal bench extraction sequence.

In this paper, a methodology to evaluate Fully Mobile In-pit Sizer and Conveyor System's (FMIPSC) application and performance is proposed. The FMIPSC system configuration is modelled using discrete-event simulation to assess its productivity, availability, utilization, and its interference with drilling and blasting stages. Different loading methods (back-up, drive-by and fixed crusher) and mining sequences (longitudinal and transversal) were analyzed. Subsequently, a model based on mixed integer linear programming is run to generate the production scheduling, extracted by selective mixed mining sequences that combine longitudinal and transversal sequences.

According to the results of the experiments conducted, the drive-by method was the most productive of the loading method. The fixed crusher and back-up methods are the best option to be applied to carry out development, selected depending of the size of the bench and mining orientation. The results demonstrate that the mixed mining sequences given by the optimization model can improve selectivity without big impacts on the operational indexes.

In conclusion, the methodology proposed may be usefully implemented to analyze the behavior of FMIPSC systems and optimize its performance, through combining high productive loading methods into mining sequences that favor selectivity.

*Para mi familia, los que están y los que partieron.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente a mi familia. A mis padres Alberto y Rocío, mi abuelo Vicente, mis hermanas Daniela y Cristina y mis sobrinas Ellice, Ariel e Isabel, por el apoyo durante todos estos años, por cada consejo, palabra de aliento y por ese cariño que se siente a pesar de la distancia.

A Nadia, Ravi, Felipe y Browser, por ser mi familia en Chile, por todas las risas, velas consumidas y por estar también en los momentos difíciles.

A mi profesor guía Nelson Morales, por depositar su confianza en mí para realizar este trabajo, por todo el tiempo invertido y su paciencia para enseñar.

A todos mis compañeros del Laboratorio Delphos, por el grato ambiente de trabajo y por la ayuda desinteresada.

A Fabián por su enorme aporte en este trabajo con la codificación del modelo de optimización, por las cuantiosas revisiones, consejos y su amistad.

A mis amigos en Ecuador, en especial a Moli y Fer por estar siempre pendientes y a todas esas personas que en estos años se volvieron grandes amigos.

Este trabajo fue financiado por el Proyecto CONICYT/PIA AFB180004

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
<b>2 METODOLOGÍA</b> .....	<b>4</b>
<b>3 ANTECEDENTES</b> .....	<b>6</b>
3.1 PLANIFICACIÓN MINERA .....	6
3.2 SISTEMAS IN-PIT CRUSHER AND CONVEYOR (IPCC) .....	7
3.3 NORMA ASARCO .....	8
3.4 TÉCNICAS DE MODELAMIENTO.....	11
3.4.1 Simulación de eventos discretos.....	11
3.4.2 Programación lineal.....	13
3.4.3 Modelamiento matemático en planificación a corto plazo en minería a cielo abierto.....	13
3.5 SOFTWARE UTILIZADO.....	15
3.5.1 Delphos Simulator (DSIM).....	15
3.5.2 Universal Delphos Sequencer & Scheduler (UDESS) .....	15
<b>4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN</b> <b>18</b>	
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	18
4.1.1 Lógica de equipos .....	18
4.1.2 Parámetros operacionales .....	21
4.1.3 Escenarios de distribución de mineral en el banco .....	22
4.1.4 Secuencia de perforación y tronadura .....	25
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN .....	27
4.1.3 Actividades UDESS, formas de extracción y precedencias .....	27
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
5.1 ARTÍCULO: Simulation and Optimization of Bench-Mining Sequences using Fully Mobile In-Pit Sizer and Conveyor Systems. ....	33

5.1.1 Anexo Artículo: Resultados de simulación de secuencias de explotación de bancos mediante FMIPSC en bancos de 360m de ancho..	45
5.2 EXPERIMENTOS ADICIONALES .....	47
5.2.1 Simulación de secuencias de explotación de escenarios de bancos con distribución de mineral mediante sistemas FMIPSC.....	47
5.2.2 Modelo de optimización de secuencias de explotación de bancos mediante FMIPSC.....	49
<b>6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>55</b>
6.1 CONCLUSIONES GENERALES .....	55
6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	56
<b>7 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>59</b>
Anexo 1. Modelo de optimización principal UDESS .....	59
Anexo 2. Distribución de tiempos de eventos del modelo de simulación ...	64
Anexo 3. Escenarios con distribución mineral favorables .....	65
Anexo 4. Escenario con distribución mineral desfavorable .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de metodología del estudio.....	5
Figura 2 Diagrama referencial para la selección y diseño minero para sistemas IPCC (Dean et al., 2015) .....	8
Figura 3 Distribución de tiempos. Normas ASARCO .....	9
Figura 4 Etapas para la construcción de un modelo de simulación (Banks, 1999) .....	12
Figura 5 Restricciones de precedencia tipo "o" (Rocher, 2011) .....	17
Figura 6 Ciclo general de operación de equipos.....	19
Figura 7 Ciclo de operación de pala .....	20
Figura 8 Ciclo de operación de perforadora.....	21
Figura 9 Distribución espacial de mineralización. Escenario favorable .....	22
Figura 10 Distribución espacial de mineralización. Escenario desfavorable .....	23
Figura 11 Análisis de contacto entre bloques. Escenario favorable .....	24
Figura 12 Análisis de contacto entre bloques. Escenario desfavorable.....	24
Figura 13 Secuencia de perforación y tronadura. Escenario favorable .....	26
Figura 14 Secuencia de perforación y tronadura. Escenario desfavorable .....	26
Figura 15 Valorización de los bloques en el modelo.....	27
Figura 16 Ejemplo de archivo de entrada del modelo.....	28
Figura 17 Valorización de actividades en el modelo.....	28
Figura 18 Ejemplo de agrupamiento de actividades en el modelo .....	29
Figura 19 Formas de extracción de producción transversales. Dirección oeste-norte (PTON), oeste-sur (PTOS), este-norte (PTEN) y este-sur (PTES).....	30
Figura 20 Formas de extracción de producción longitudinales. Dirección oeste-sur (PLOS), este-sur (PLES), oeste-norte (PLON) y este-norte (PLEN).....	30
Figura 21 Formas de extracción en desarrollo. Dirección norte (DN), sur (DS) y oeste (DO).....	31
Figura 22 Artículo. Methodology scheme.....	35



Figura 23 Artículo. Fully mobile crushing and conveyor system (Oberrauner et al., 2012) .....	36
Figura 24 Artículo. Back-up loading method. (a) single sided (b) double sided.	37
Figura 25 Artículo. Drive-by loading methods (a) 20m working face width (b) 24m working face width. Fixed crusher loading methods (c) 48m working face width (d) 60m working face width .....	38
Figura 26 Artículo. Bench mining and blasting plans sequences. (a) longitudinal sequence (b) transversal sequence .....	39
Figura 27 Artículo. Loading methods simulation results. (a) percentage of time in equipment relocation (b) loading cycle time .....	41
Figura 28 Artículo. Production rate by method.....	41
Figura 29 Artículo. Simulation results. (a) FMIPSC utilization (b) FMIPSC production rate .....	43
Figura 30 Resultados de simulación. (a) Utilización del sistema (b) Rendimiento .....	45
Figura 31 Distribución de uso de tiempo disponible .....	46
Figura 32 Resultados de simulación de escenarios. Utilización del sistema .....	48
Figura 33 Resultados de simulación de escenarios. Número de cambios de tipo de material.....	49
Figura 34 Resultados del modelo de optimización. Secuencia de explotación de escenario favorable .....	50
Figura 35 Resultados del modelo de optimización. Secuencia de explotación de escenario desfavorable .....	51
Figura 36 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Utilización del sistema FMIPSC .....	51
Figura 37 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Rendimiento del sistema FMIPSC .....	52
Figura 38 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Número de cambios de tipo de material extraído.....	53

Figura 39 (a) Secuencia de explotación del modelo (b) Secuencia de explotación manual.....	54
Figura 40 Resultados de simulación secuencia modelo vs. manual. (a) Rendimiento (b) Utilización del sistema FMIPSC.....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones de bancos seleccionados .....	18
Tabla 2 Resultados de análisis de contacto entre bloques.....	24
Tabla 3 Artículo. Failure event distribution.....	39
Tabla 4 Artículo. Cyclical event distribution .....	40
Tabla 5 Artículo. Loading methods combination options .....	42
Tabla 6 Opciones de combinaciones de métodos de carguío .....	45
Tabla 7 Tiempos de extracción por forma de explotación de actividades .....	50

# 1 INTRODUCCIÓN

La minería es definida como la actividad de extracción de material de ocurrencia natural de la tierra mediante métodos a cielo abierto en superficie o métodos subterráneos con el fin de generar un beneficio económico.

Los métodos de explotación a cielo abierto son una de las técnicas para la extracción de minerales más usadas hoy en día en minería, aplicados principalmente para la extracción de mineral de yacimientos masivos y superficiales. Estos métodos usan, en su gran mayoría, equipos como palas y camiones para llevar a cabo las operaciones de carguío y transporte del material explotado, consiguiendo grandes resultados debido a la flexibilidad que entrega este sistema. Sin embargo, la incertidumbre en los precios de los minerales, el variable precio de los combustibles y el aumento en los costos operativos, principalmente de transporte debido a la profundización de la extracción en el rajo, se han convertido en desafíos a enfrentar para los proyectos mineros, los cuales buscan mantenerse competitivos en el negocio minero. Una de las alternativas más atractivas a ser evaluadas por las empresas para hacer frente a dichos desafíos es la implementación de sistemas de correas y chancadores dentro del pit, conocidos como *In-Pit Crusher and Conveyor* (IPCC).

El análisis de implementación de nuevas tecnologías es una parte importante dentro de la planificación minera, ya que permite tener una estimación del comportamiento del sistema evaluado previo a su implementación en un proyecto real. Además, permite optimizar la operatividad del sistema mediante modelamiento matemático y el uso de herramientas de optimización.

## 1.1 MOTIVACIÓN

A medida que las explotaciones mineras a cielo abierto se profundizan, las distancias de transporte a los distintos destinos (planta, stock o botaderos) se hacen mayores y los costos operacionales para dicha operación aumentan, requiriendo, a su vez, un mayor número de camiones para mantener la productividad de la mina. Resolver este problema de transporte en minería a cielo abierto es un tema de mucho interés en la actualidad. Algunas de las soluciones evaluadas incluyen el uso de camiones de gran capacidad (ultra-class), camiones autónomos, cambiar a un sistema de explotación subterráneo e implementar sistemas IPCC (Osanloo & Paricheh, 2019).

Los sistemas IPCC tienen distintas configuraciones que son elegidas según las características propias del yacimiento y requerimientos de producción. Estas

configuraciones dependen del tipo de chancador empleado y pueden clasificarse en:

- IPCC con chancador fijo.
- IPCC con chancador semi-fijo o semi-móvil.
- IPCC con chancador móvil o *Fully Mobile In-pit Crusher and Conveyor* (FMIPCC).

Los sistemas IPCC y más específicamente su variante con chancador móvil (FMIPCC), contemplan muchos beneficios con respecto a los sistemas tradicionales de pala-camión como un menor costo operacional, requerimiento de mano de obra e impacto ambiental. Sin embargo, no hay una metodología establecida para planificar la extracción mediante sistemas FMIPCC y más específicamente, para definir la correcta secuencia de extracción de los bancos.

Con el propósito de aportar a la solución del problema de transporte en minería a cielo abierto, se pretende modelar un sistema *Fully Mobile In-pit Sizer and Conveyor* (FMIPSC), que tiene la particularidad de utilizar un chancador móvil tipo *sizer* como unidad de chancado, y evaluar, con la ayuda de herramientas de simulación de eventos discretos, los índices operacionales de rendimiento, utilización y disponibilidad del sistema mientras opera bajo diferentes escenarios de secuencias de explotación y distribución de mineral en el banco. De esta manera, se cuantifica la interferencia entre las operaciones de carguío, chancado y transporte; y las operaciones paralelas de perforación y tronadura.

Adicionalmente, se modela el secuenciamiento de extracción de un banco mediante sistemas FMIPSC con el objetivo de generar secuencias de explotación de orientación mixta (longitudinales y transversales) que maximicen el rendimiento del sistema, alcanzando una mayor selectividad en la explotación.

## **1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **1.2.1 Objetivo general**

Proveer una metodología que permita maximizar el rendimiento de los sistemas *Fully Mobile In-pit Sizer and Conveyor* (FMIPSC) aplicado a diversos escenarios de tamaño de banco y distribución de mineral.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar, mediante simulaciones de eventos discretos, diferentes alternativas de carguío compatibles con los sistemas FMIPSC.
- Determinar los índices operacionales de utilización, disponibilidad y rendimiento del sistema FMIPSC bajo secuencias de extracción longitudinales y transversales.
- Determinar la interferencia operacional existente entre las operaciones de perforación y tronadura y extracción del material.
- Implementar un modelo de optimización que permita obtener secuencias de extracción selectivas que maximicen el rendimiento del sistema FMIPSC.

### 1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

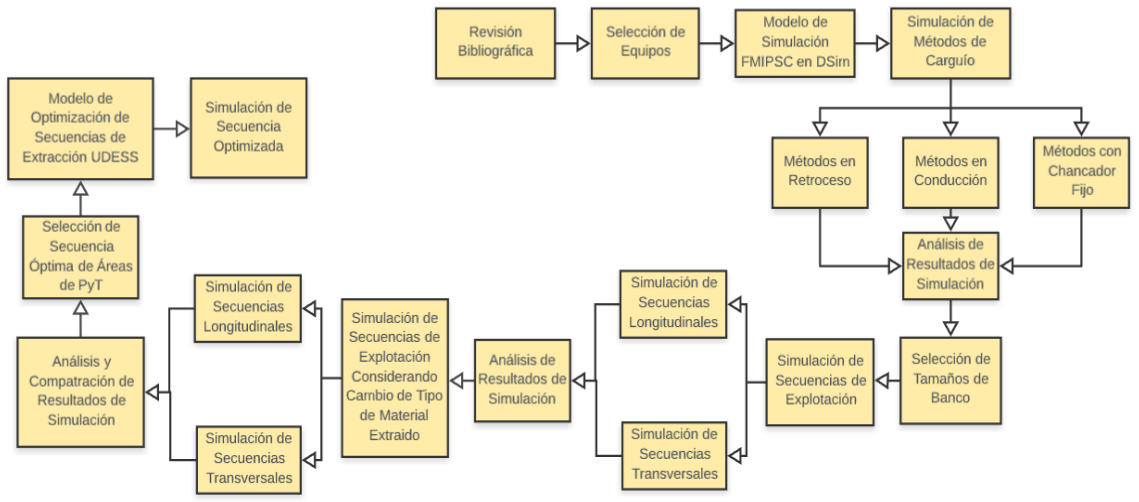
- El trabajo se engloba en la explotación de bancos mineros a cielo abierto mediante el uso de sistemas semi-continuos, incluyendo equipos de arranque y carguío (pala), chancado (*sizer* móvil) y transporte (correas transportadoras súper portables).
- Los métodos de carguío evaluados toman en cuenta el tamaño, ubicación de los equipos en el frente y frecuencia de relocalización de los mismos. Además, los anchos operacionales que aseguran la correcta movilidad de los equipos y la seguridad en la operación.
- En la simulación, los tiempos de mantenimiento programado, distribuciones de probabilidad de falla y tiempos promedio de reparación de los equipos utilizan distribuciones de probabilidad triangulares.
- Los escenarios de distribución mineral en el banco toman en cuenta únicamente el tipo de material (estéril o mineral) del bloque y no las leyes de los mismos.
- El modelo de optimización no contempla penalizaciones por traslado de los equipos entre actividades.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología usada se resume a continuación:

1. Revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas a:
  - a) Sistemas IPCC y sus variantes
  - b) Simulación de eventos discretos
  - c) Modelamiento matemático
2. Selección de los equipos FMIPSC a evaluar según su disponibilidad en el mercado y facilidad de acceso a la información sobre los mismos, evaluando el match correcto entre equipos en términos de capacidad y conectividad.
3. Se simula el comportamiento del sistema FMIPSC al ejecutar diversos métodos de carguío (conducción, retroceso y chancador fijo) y secuencias de extracción (longitudinal y transversal). Se considera el efecto del proceso de limpieza de las correas transportadoras debido al cambio de tipo de material transportado en escenarios con distribución de mineral reales.
4. Basados en el análisis de resultados de las simulaciones se implementa un modelo de optimización cuya función objetivo es minimizar el tiempo de extracción del banco, optando por secuencias de extracción con orientación mixta (longitudinal y transversal) compatibles con la operatividad de los sistemas FMIPSC.
5. Finalmente, las secuencias de extracción obtenidas por el modelo se simulan y son comparadas con los resultados anteriores pudiendo evaluar el trade-off entre selectividad y rendimiento.

En la Figura 1 se muestra un esquema de la metodología de la investigación.



**Figura 1 Esquema de metodología del estudio**



### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 PLANIFICACIÓN MINERA

La planificación minera se define como el proceso de ingeniería que conjuga el recurso mineral con el mercado para delinear el mejor negocio productivo (Rubio, 2006) según los objetivos estratégicos de la empresa.

De acuerdo con Newman et al. (2010), se puede categorizar el proceso de planificación minera en niveles de acuerdo a las características de las decisiones tomadas en:

- **Estratégicas:** se refieren a la elección de los métodos de explotación, capacidad mina y de procesamiento, y la estimación de las reservas mineras. Con el fin de sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión de la compañía.
- **Tácticas:** determina la forma de alcanzar el objetivo establecido previamente por la planificación estratégica. Su resultado es el plan minero, que define el cómo y el cuándo se extraerán los recursos, estableciendo los recursos humanos y materiales a utilizar.
- **Operativas:** se busca la optimización de los procesos y la definición de los indicadores operativos. Aquí se produce la retroalimentación hacia la planificación conceptual con el fin de alinearse con el plan minero.

Según el nivel de detalle y grado de información se puede categorizar la planificación minera en:

- **Planificación de largo plazo:** en esta etapa se define el límite económico del pit final, estableciendo el tamaño y profundidad de la mina, sistema minero y secuenciamiento de la explotación. El plan de largo plazo se ajusta a la visión estratégica de la compañía y se analiza anualmente.
- **Planificación de mediano plazo:** se encarga de definir la secuencia y el agendamiento de extracción de material en un horizonte de meses hasta dos años orientado al cumplimiento de las metas productivas a largo plazo.
- **Planificación de corto plazo:** el horizonte de planificación es usualmente diario, semanal, mensual y trimestral. Busca establecer metas para alcanzar los objetivos de producción del mediano plazo sujeto a las condiciones y restricciones de la operación.

### **3.2 SISTEMAS IN-PIT CRUSHER AND CONVEYOR (IPCC)**

En minería a cielo abierto, las operaciones de transporte pueden llegar a representar más del 50% de los costos operativos y más del 60% del capital de inversión. Es por esto, que las empresas mineras evalúan alternativas como la implementación de sistemas IPCC con el fin de optimizar la operación de transporte. La aplicación de estos sistemas pueden reducir los costos operativos debido al uso de correas para el transporte del material, siendo generalmente más eficientes en términos de inversión y uso de energía (Oberrauner, Turnbull, & Systems, 2012).

Oberrauner et al. (2012) describen los diferentes tipos de sistemas IPCC, clasificándolos en: sistemas IPCC fijos, semi-móviles y móviles. Los autores evalúan, a su vez, las diferentes estrategias de salida del pit al usar correas transportadoras, tomando en cuenta parámetros como el uso energético y la inclinación de las correas transportadoras.

Londoño, Knights, & Kizil (2013), evalúan la alternativa de implementación de un sistema IPCC con una dragalina como equipo de carguío, aplicada en el pre-stripping de una mina de carbón a cielo abierto. En este trabajo los autores realizan simulaciones de diferentes configuraciones de métodos de carguío variando el tamaño de los bloques y la ubicación de la dragalina y la estación de chancado móvil. Parámetros como el desplazamiento de los equipos y el ángulo de giro de la dragalina determinan la mejor de las configuraciones evaluadas. Además, estudian la rentabilidad de introducir redundancia al sistema introduciendo líneas de correas transportadoras paralelas y analizan la confiabilidad y el impacto en la utilización que esta redundancia entrega al sistema.

Atchinson & Morrison (2011) detallan los principales factores a ser tomados en cuenta para la correcta operación de los sistemas IPCC en bancos utilizando correas de banco relocalizables. Los tópicos abordados incluyen: selección correcta de los equipos del sistema IPCC, productividad de los equipos, interacción con operaciones de perforación y tronadura; y la secuencia de extracción entre bancos.

Morriss (2008) expone los estudios de prefactibilidad realizados por la empresa Sandvik para evaluar la implementación de sistemas IPCC y FMIPCC. El trabajo se enfoca en analizar los parámetros que afectan la productividad de los sistemas IPCC para determinar índices operacionales como disponibilidad, utilización y por consiguiente, horas efectivas de operación.

Dean et al. (2015) describen las ventajas que presentan los sistemas FMIPCC con respecto a los sistemas tradicionales pala-camión, así como las limitaciones más

comunes para la aplicación de estos sistemas en minas metalíferas a cielo abierto. Los autores examinan las potenciales soluciones a estas limitaciones y proponen un marco de referencia para la planificación y diseño de minas para sistemas IPCC (Figura 2).

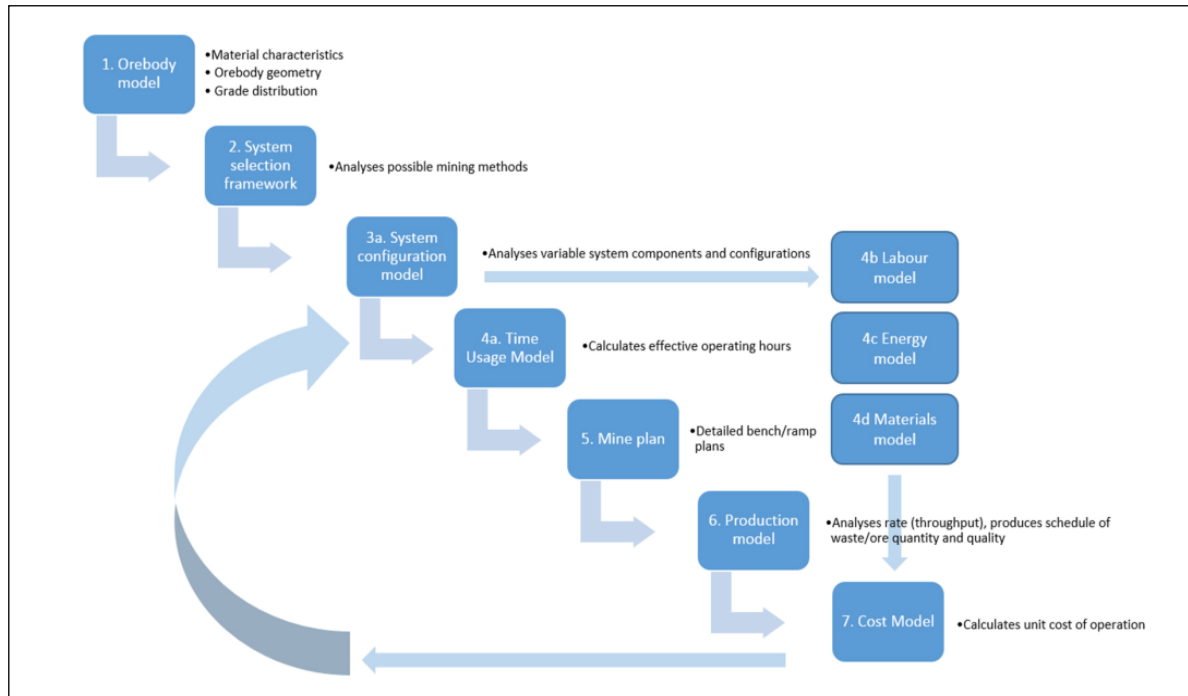


Figura 2 Diagrama referencial para la selección y diseño minero para sistemas IPCC (Dean et al., 2015)

### 3.3 NORMA ASARCO

La norma ASARCO (*American Smelting & Refining Co.*) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos que un equipo, máquina o instalación incurre durante un periodo de tiempo (CODELCO, 2005). La distribución de estos tiempos se muestra en la Figura 3.

Definición de tiempos:

- **Nominal:** Espacio de tiempo en que se produce la medición, correspondiente al espacio muestral. Depende del tiempo de continuidad de la producción en la faena.
- **Fuera de servicio:** espacio de tiempo en que el equipo no se encuentra disponible,

tanto sea por una mantención programada o falla en que haya incurrido.

- **Disponible:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra capacitado de realizar tareas.
- **Reserva:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para realizar alguna tarea, pero que por alguna condición específica no está siendo utilizado.
- **Operativo:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para realizar tareas y cumple con actividades asociadas a la operación.
- **Demoras programadas:** espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero donde se deben cumplir ciertas actividades normadas por la ley, como lo son los cambios de turno o tiempos de colación.
- **Demoras no programadas:** espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero que ocurren debido a condiciones o circunstancias propias de la operación, o ineficiencias de ésta.
- **Pérdidas operacionales:** espacio de tiempo en que el equipo no realiza las tareas para las que fue diseñado, debido principalmente a tiempos de espera del equipo.
- **Efectivo:** espacio de tiempo en que el equipo realiza las tareas acordes a su funcionalidad.

Tiempo Nominal					
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio	
				Prog.	Imprevistas
Tiempo Operativo			Reservas		
Tiempo	Pérdidas	Demoras			
Efectivo	Operacionales	Prog.	No Prog.		

**Figura 3 Distribución de tiempos. Normas ASARCO**

Existen ciertos indicadores de tiempo que derivan de la norma ASARCO, los que corresponden a:

- **Disponibilidad:** es el porcentaje de horas nominales en que la flota, equipo,

máquina o instalación, estuvo en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operado. Sirve para establecer la capacidad de mantenimiento y el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación.

$$\textit{Disponibilidad} (\%) = \frac{\textit{Hrs. Nominales} - \textit{Hrs. Mantenimiento, Reparación}}{\textit{Hrs. Nominales}} \cdot 100$$

- **Utilización (Base nominal):** es el porcentaje sobre las horas nominales en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Corresponde a la división entre el número de horas efectivas y horas nominales. Sirve para establecer la eficacia de la operación mina respecto del uso eficiente que se le da a la flota, equipo, máquina o instalación.

$$\textit{Utilización (base nominal)} (\%) = \frac{\textit{Hrs. Efectivas}}{\textit{Hrs. Nominales}} \cdot 100$$

- **Utilización efectiva (Base disponible):** es el porcentaje sobre las horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Sirve para proveer información sobre la eficacia operacional del proceso.

$$\textit{Utilización (base disponible)} (\%) = \frac{\textit{Hrs. Efectivas}}{\textit{Hrs. Disponibles}} \cdot 100$$

- **Utilización operativa:** es el porcentaje sobre las horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra operativo. Sirve para proveer información acerca de la capacidad de excedente que está disponible.

$$\textit{Utilización operativa} (\%) = \frac{\textit{Hrs. Operativas}}{\textit{Hrs. Disponibles}} \cdot 100$$

- **Factor de utilización:** es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas.

$$\textit{Factor utilización} (\%) = \frac{\textit{Hrs. Efectivas}}{\textit{Hrs. Operativas}} \cdot 100$$

### **3.4 TÉCNICAS DE MODELAMIENTO**

#### **3.4.1 Simulación de eventos discretos**

La simulación es una técnica numérica implementada para realizar experimentos mediante un computador utilizando ciertas relaciones lógico-matemáticas, las cuales describen el comportamiento y estructura de sistemas complejos a través de ciertos periodos. Por lo tanto, es una imitación de la operación de un proceso real o sistema en el tiempo, que implica la generación y observación de una historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se representa (Banks, 1999).

La simulación de eventos discretos (DES en inglés), es un tipo de simulación que relaciona ciertos eventos por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas. En ingeniería de minas se ha utilizado esta herramienta para la evaluación de desempeño de sistemas mineros complejos, tanto en minas a cielo abierto como subterráneas. Las herramientas de DES permiten evaluar las interacciones y/o interferencias internas entre equipos, disponibilidad, utilización y el rendimiento global del sistema.

Según García et al. (2006) dentro de los elementos claves para el éxito de un modelo de simulación que se deben tener en cuenta se encuentran la cantidad y duración de las réplicas, variables de respuesta, relaciones entre variables, distribución de las variables aleatorias y el uso de la información.

La metodología utilizada para desarrollar un modelo de simulación fue elaborada por Banks (1999). El esquema de esta metodología se puede apreciar en la Figura 4.

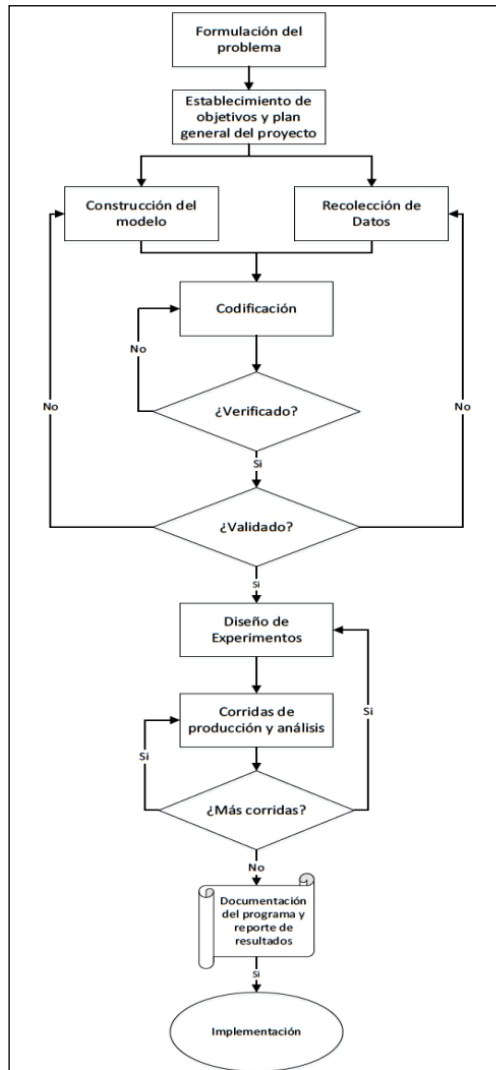


Figura 4 Etapas para la construcción de un modelo de simulación (Banks, 1999)

Fioroni et al. (2008) asocia la simulación con la optimización para permitir alcanzar metas de mezcla de material en agendamiento de producción a corto plazo consiguiendo así representar de mejor manera al sistema minero real. En su trabajo el modelo de optimización realiza la asignación de equipos mientras que la simulación de eventos discretos reproduce la aleatoriedad de los eventos de falla de los equipos y la variación de duración de los procesos. El optimizador es llamado cada vez que ocurren cambios en el sistema (fallas de los equipos y escases de material disponible) e itera una nueva optimización.

### 3.4.2 Programación lineal

La programación lineal es una técnica de modelamiento matemático. Se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables, lo cual está sujeto a una serie de restricciones que se expresan en forma de inecuaciones y/o ecuaciones lineales (Valdez & Orosco, 2011). El problema es lineal si es que tanto la función objetivo como las restricciones son lineales, es decir, cumplen con las propiedades de proporcionalidad y aditividad.

Los elementos básicos que un problema de programación lineal (PPL) debe incluir son los siguientes:

- **Función objetivo:** función lineal que se busca optimizar.
- **Variables de decisión:** factores controlables del sistema modelando. Éstas pueden tomar diversos valores posibles, de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, que contribuya con la consecución de la función objetivo.
- **Restricciones:** limitan la libertad de los valores que pueden llegar a tomar las variables de decisión.

Un problema genérico puede representarse según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \max Z &= c^T x \\ \text{s. a} \begin{cases} Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

En donde:

$$\begin{aligned} A &= \text{Matriz de } m \times n \\ c, x &= \text{Pertenece a } \mathbb{R}^n \\ b &= \text{Pertenece a } \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

Con la llegada de computadoras con mayores capacidades de cómputo este tipo de herramientas matemáticas han sido utilizadas para resolver problemas que contemplan una gran cantidad de variables en los que se incluyen problemas de la industria minera.

### 3.4.3 Modelamiento matemático en planificación a corto plazo en minería a cielo abierto

La planificación minera operacional contempla el agendamiento de la producción a



corto plazo en la que se define el orden de extracción de bloques de material en la mina en un horizonte de planificación de días, semanas y meses. Este plan tiene el objetivo de adaptarse a un plan minero de mediano y largo plazo. Este tipo de planificación define el agendamiento considerando restricciones operacionales intra-banco tomando en cuenta las direcciones de acceso a los bloques, orientación de la explotación y secuencia de extracción.

Smith (1998) integra el software de modelamiento AMPL/CPLEX para abordar el problema de agendamiento a corto plazo. En su trabajo restringe el número de precedencias que pueden estar activas para acceder a los bloques y definir la dirección de minado de los bancos. En su trabajo compara un agendamiento manual a un agendamiento automatizado, resaltando los beneficios de usar programación matemática para el agendar la producción.

Gholamnejad (2008) propone un modelo de programación entera con variables binarias para incorporar el problema de accesibilidad a los bloques restringiendo el número de direcciones de acceso a los mismos. De esta manera, cada bloque del modelo posee una cara libre que permite las operaciones de carguío y transporte. Además, el modelo permite evaluar el cumplimiento de metas productivas, en términos de calidad y cantidad de mineral que se abastece a la planta.

Eivazy & Askari-Nasab (2012) proponen un modelo de programación lineal entera mixta con multi-destinos resuelto por medio del método de optimización *branch and cut* usando el optimizador TOMLAB/ CPLEX. Los autores buscan minimizar los costos en las operaciones considerando pilas de stock, decisiones operacionales de las rampas y direcciones horizontales de minado. El trabajo evalúa diferentes escenarios en donde se varía la dirección horizontal de explotación aplicando restricciones de precedencias a los bloques.

L'Heureux, Gamache, & Soumis (2013) proponen un modelo de programación entera mixta para abordar el tema de agendamiento a corto plazo en un periodo de hasta tres meses. Modelan la precedencia entre bloques y precedencias entre actividades (perforación, tronadura y extracción). El modelo considera el desplazamiento de la pala en el banco y su capacidad. Se realizan el agrupamiento de los bloques en frentes y áreas para facilitar el correcto secuenciamiento entre operaciones de perforación y tronadura.

Mousavi, Kozan, & Liu (2016) presentan un modelo matemático para agendamiento de bloques a corto plazo en el que toma en cuenta aspectos técnicos de la explotación incluyendo las relaciones de precedencias entre bloques, capacidad de los equipos, requerimientos de ley, demanda de procesamiento y manejo de pilas de stock. Los autores toman en consideración el problema de accesibilidad a los bloques no solamente en direcciones laterales sino también precedencias con bloques del banco superior para

modelar la apertura de nuevos bancos.

### **3.5 SOFTWARE UTILIZADO**

#### **3.5.1 Delphos Simulator (DSIM)**

Delphos Simulator (DSIM) es una herramienta de planificación desarrollada por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos, que permite estimar la producción de un plan minero. DSIM utiliza la simulación de eventos discretos para la simulación de sistemas de manejo de materiales. DSIM entrega reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo a partir de tres elementos básicos: el *layout* de la mina (frentes de carga, descarga y rutas), la flota de equipos de carga y transporte, y un plan minero que indica la cantidad de material que se envía desde cada frente a cada destino.

Este simulador ha sido principalmente utilizado en minería a cielo abierto, donde se han desarrollado estudios de cálculo de productividad de camiones (convencionales y autónomos), de palas y análisis de distribución de tiempos de operación.

El software DSIM ha sido adaptado para evaluar otras alternativas de sistemas de manejo de materiales como son los sistemas IPCC, *High Angle Conveying* (HAC), etc.

#### **3.5.2 Universal Delphos Sequencer & Scheduler (UDESS)**

UDESS es una herramienta computacional desarrollada por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile. El software tiene como objetivo generar la secuencia y agendamiento óptimo de actividades generalmente maximizando el valor presente neto. El resultado entregado es la porción de la actividad realizada en cada periodo de tiempo y los recursos obtenidos y/o consumidos, tales como: tonelaje, ingresos, costos, etc.

El problema a resolver es limitado mediante restricciones de precedencia entre actividades, así como también mediante restricciones de capacidad de recursos consumidos por periodo.

El modelo toma como unidad básica de trabajo una actividad. Las actividades son agendadas en el tiempo, construyendo finalmente un plan de producción.

Los parámetros de las actividades son:

- **ID:** nombre con el cual se caracteriza la actividad.
- **Ingreso o costo:** corresponde al valor de la actividad. Dependiendo del tipo de actividad puede tener un valor positivo o negativo.
- **Tasa máxima de avance:** es la porción máxima de una actividad que puede realizarse en un mes.
- **Recursos consumidos:** cantidad de recursos que consume la actividad según su progreso.
- **Precedencias:** establece una secuencia operacional entre ciertas actividades que deben ser realizadas previamente para habilitar la realización de otra actividad.

En el presente trabajo la herramienta UDESS se aplica para modelar la explotación de bancos mineros mediante FMIPSC, con el objetivo de minimizar el tiempo de extracción del banco y obtener una secuencia de extracción que evite el recurrente cambio en tipo el tipo de material extraído, permitiendo tener selectividad en la explotación.

Las actividades agendadas están conformadas por bloques de material existentes en el banco. El agendamiento de la extracción de estas actividades en el tiempo está limitado por la capacidad del sistema y por las precedencias de acceso a los bloques, las mismas que permiten generar una secuencia de explotación factible, garantizando el espacio operacional necesario para la implementación de dichos sistemas.

### 3.5.2.1 Archivos de entrada

- **Archivo de actividades:** en este archivo se especifican todas las actividades y sus correspondientes atributos.
- **Archivo de precedencias:** en este archivo se indica las restricciones de precedencia de las actividades. Las precedencias pueden ser individuales, donde solo una actividad necesita ser realizada previamente, o agrupadas, donde un conjunto de actividades debe ser realizada previamente para habilitar la ejecución de una actividad. UDESS acepta precedencias de tipo “o” donde solamente un grupo de actividades del total de precedencias a una actividad necesita ser realizado para poder iniciarse.

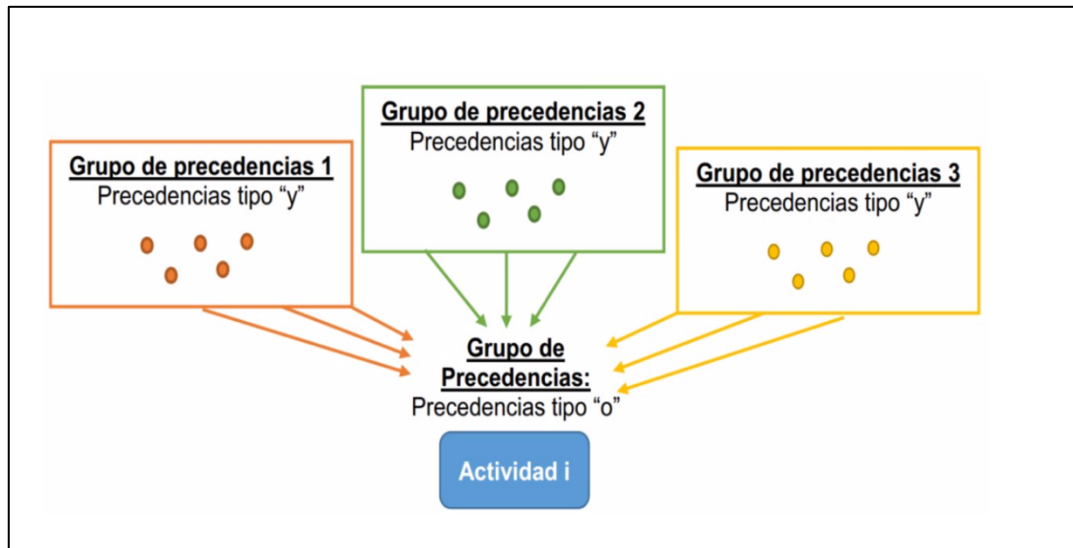


Figura 5 Restricciones de precedencia tipo "o" (Rocher, 2011)

### 3.5.2.2 Archivo de salida

- **Archivo instance:** resume los datos de entrada utilizados. Muestra el número de periodos, actividades, tasa de descuento por periodo y restricciones.
- **Archivo output:** muestra los resultados obtenidos por el modelo, indicando los recursos consumidos y el progreso de cada una de las actividades.

## 4 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación replica el funcionamiento de los equipos que componen el sistema FMIPSC desde el proceso de carguío del material del frente por medio de la pala y su descarga en la tolva receptora del *sizer*. Así también, el control de flujo de chancado y descarga del material a la correa horizontal y posteriormente a las correas súper portables.

Los escenarios de tamaño de banco seleccionados son:

- 1000[m]x120[m]
- 880[m]x240[m] y
- 720[m]x360[m].

Escenario	Ancho [m]	Largo [m]	Altura [m]	Tonelaje
1	120	1000	15	4.680.000
2	240	880	15	8.236.800
3	360	760	15	10.670.400

Tabla 1 Dimensiones de bancos seleccionados

120[m] es el ancho mínimo necesario del banco que permite la operación mediante FMIPSC dado el tamaño de los equipos seleccionados. Los tamaños de banco elegidos toman como limitante un total de hasta 13 correas súper portables disponibles por banco.

Los equipos se definen como objetos y dependiendo del tipo de objeto siguen una lógica de funcionamiento y adquieren ciertos parámetros operativos, los cuales se muestran en los siguientes apartados.

#### 4.1.1 Lógica de equipos

Se definen los siguientes equipos en operación:

- **Pala:** equipo que remueve el material tronado del frente y lo descarga en la tolva de la estación de chancado móvil.
- **Sizer móvil:** estación de chancado móvil que tritura el material y lo descarga en las correas transportadoras a través de una correa de sacrificio.
- **Correa horizontal:** correa transportadora con tolva receptora de tamaño completo que recibe el material triturado de la estación de chancado.
- **Correas súper portables:** correas transportadoras de gran movilidad y adaptabilidad que transportan el material fuera de la mina.

La Figura 6 muestra la lógica operacional general que siguen los equipos en la simulación.

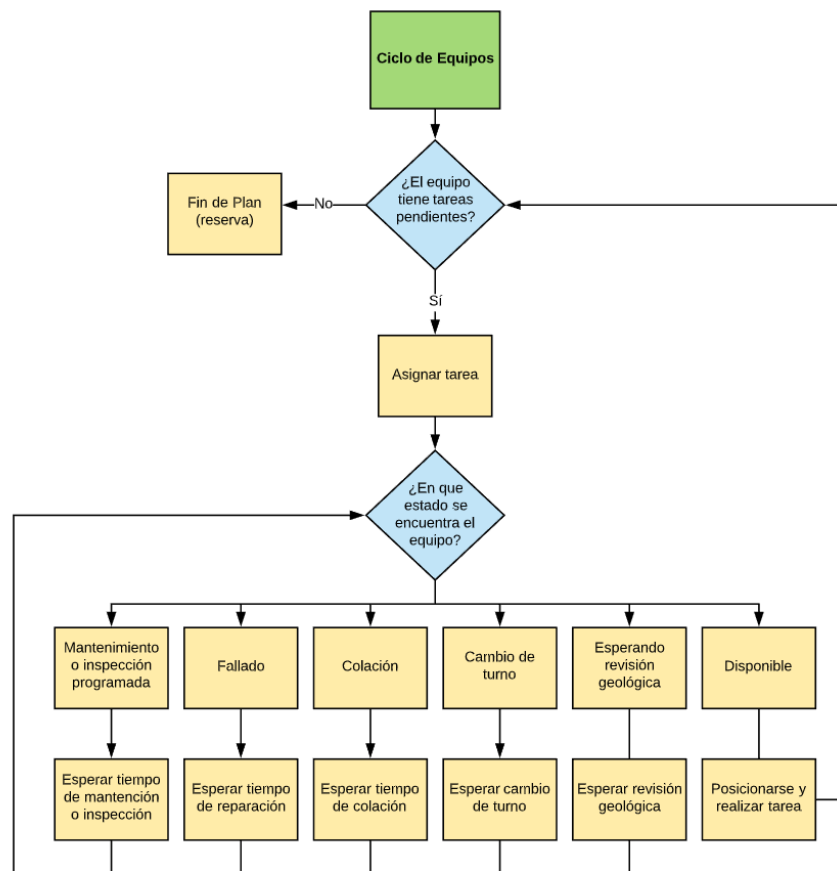


Figura 6 Ciclo general de operación de equipos

Las Figuras 7 y 8 muestran el ciclo operativo de los equipos de carguío y perforación respectivamente.

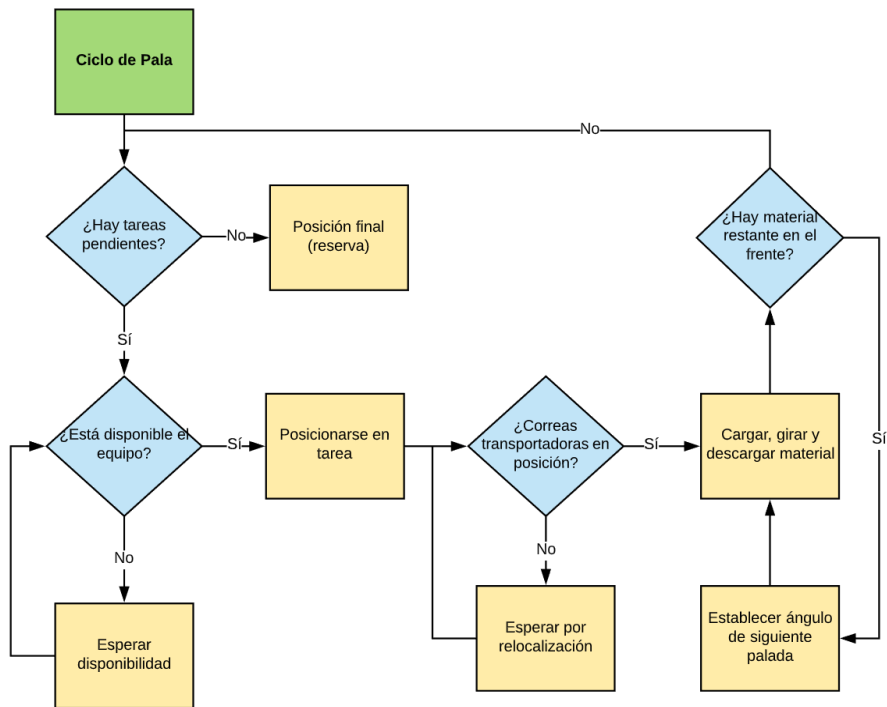


Figura 7 Ciclo de operación de pala

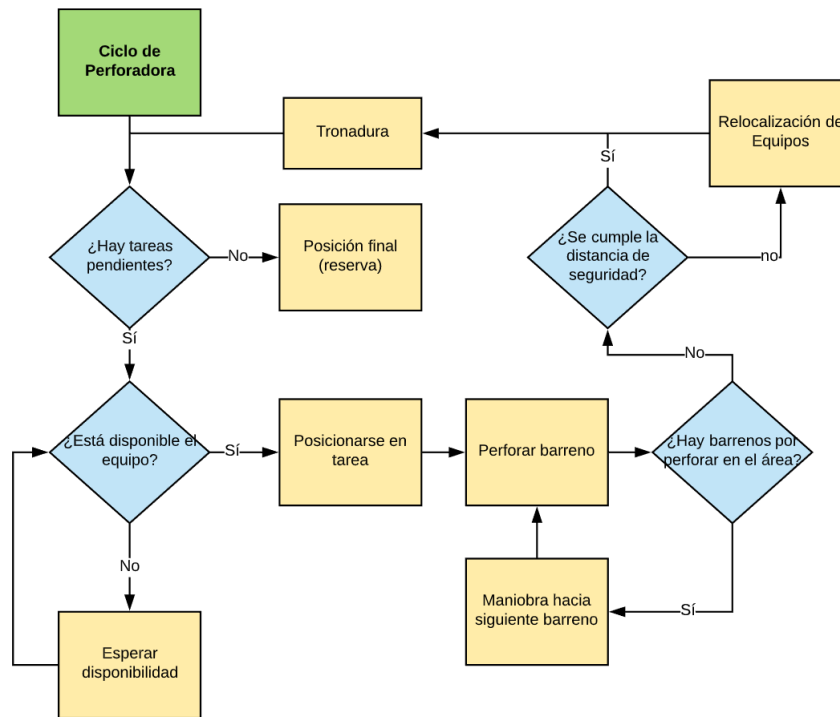


Figura 8 Ciclo de operación de perforadora

#### 4.1.2 Parámetros operacionales

Los parámetros operacionales son valores que caracterizan una propiedad de la operación. Pueden ser valores fijos o distribuciones.

- **Tarea:** actividad que realiza un equipo en el frente. Para el caso de la pala corresponde al tonelaje movido por avance, mientras que para la perforadora representa el número de barrenos perforados por área de tronadura.
- **Tiempo de tarea:** tiempo transcurrido desde que se inicia la tarea hasta que se termina. Corresponde al tiempo acumulado de cada ciclo de operación que realiza el equipo hasta que la tarea es completada.
- **Tiempo de traslado:** es el tiempo de relocalización de los equipos hasta la siguiente tarea asignada.
- **Tiempo de eventos:** tiempo entre ocurrencia y duración de eventos. En este trabajo se utilizan distribuciones de probabilidad triangular.



La distribución de tiempos de los eventos tanto programados como de falla y reparación se encuentran detallados dentro del apartado de anexos.

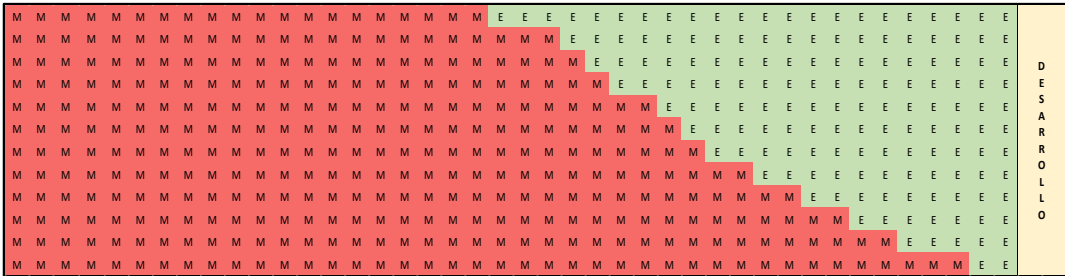
**4.1.3 Escenarios de distribución de mineral en el banco**

Con la finalidad de evaluar el rendimiento del sistema FMIPSC al operar en bancos de 880[m]x240[m] con presencia de más de un tipo de material, se seleccionan dos escenarios de distribución de mineralización a partir de un modelo de bloques obtenido de MineLib (Espinoza, Goycoolea, & Moreno, 2012) de un depósito de cobre ubicado en Arizona (KD).

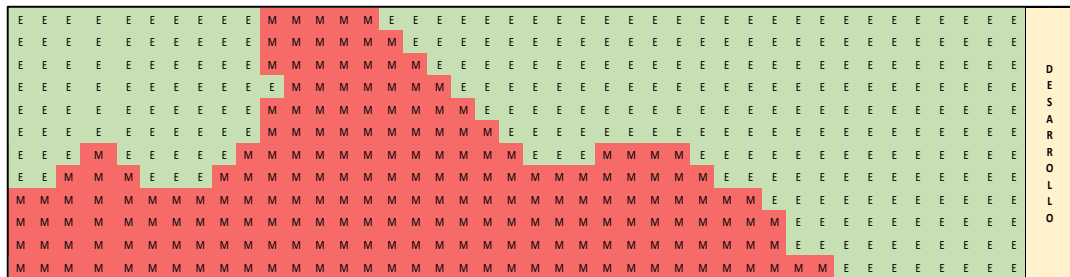
Los escenarios evaluados corresponden a dos cotas diferentes dentro del yacimiento, con bloques de 20[m]x20[m]x15[m] de tamaño. Los bloques en color rojo (M) representan bloques de mineral mientras que los verdes (E) representan material estéril.

Para los casos de estudio donde se consideran bancos con más de un tipo de material se añade al modelo de simulación eventos de limpieza de las correas transportadoras por cambio de destino (planta o botadero) con una duración de 20 minutos por cada vez que la pala cambia el tipo de material descargado al *sizer*.

En las Figuras 9 y 10 se muestra la distribución mineral en el banco para los escenarios seleccionados.



**Figura 9 Distribución espacial de mineralización. Escenario favorable**



**Figura 10 Distribución espacial de mineralización. Escenario desfavorable**

Los escenarios se categorizan en escenario favorable y desfavorable basados en un análisis manual de contacto entre los bloques que componen el banco. Es decir, cada uno de los bloques se caracteriza según su propio tipo de material (estéril o mineral) y según el tipo de material de los bloques que lo rodean.

La categorización de los escenarios compara los dos escenarios seleccionados entre ellos, siendo uno más favorable que el otro según la continuidad de la mineralización en el banco. Otros escenarios evaluados (Anexo 3 y 4) muestran distribuciones de mineral mayormente favorables como desfavorables. Sin embargo, estos no se consideran teniendo en cuenta la menor probabilidad de ocurrencia de estos en la realidad en comparación a los escenarios seleccionados.

La nomenclatura usada para el análisis de contacto entre bloques se lista a continuación:

- MM: bloque de mineral en contacto únicamente con bloques de mineral.
- EE: bloque de estéril en contacto únicamente con bloques de estéril.
- EM: bloque de estéril en contacto con al menos un bloque de mineral.
- ME: bloque de mineral en contacto con al menos un bloque de estéril.



Figura 11 Análisis de contacto entre bloques. Escenario favorable



Figura 12 Análisis de contacto entre bloques. Escenario desfavorable

Tipo de contacto	Escenario Favorable		Escenario Desfavorable	
	N° de bloques	Porcentaje de bloques	N° de bloques	Porcentaje de bloques
EE	120	24%	235	47%
MM	320	63%	157	31%
ME	32	6%	57	11%
EM	32	6%	55	11%
MM + EE	440	87%	392	78%
EM + ME	64	13%	112	22%
Bloques	504	100%	504	100%

Tabla 2 Resultados de análisis de contacto entre bloques

Un escenario con mayor proporción de bloques de un tipo de material rodeado de bloques del mismo tipo se considera mayormente favorable, teniendo en cuenta que esto representa una mineralización más uniforme en el banco.

#### 4.1.4 Secuencia de perforación y tronadura

Las áreas de perforación y tronadura tienen tamaños de 120[m]x120[m] y contienen un total de 36 bloques (561,600[t]) cada una, con la finalidad de respetar la distancia de seguridad entre área a tronar y los equipos FMIPSC, y favorecer la continuidad en la explotación.

La secuencia de perforación y tronadura de las áreas mencionadas se seleccionan previamente, de forma manual, con el objetivo de favorecer la extracción continua de un solo tipo de material, garantizando, además, el acceso del equipo de perforación a las diferentes áreas desde el nivel superior del banco.

Las áreas de perforación y tronadura se categorizan según el material (estéril o mineral) predominante (>50%) existente en cada área. La secuencia favorece inicialmente a las áreas con el tipo de material que se encuentran inmediatamente accesible desde la apertura del banco (*Boxcut*). La secuencia continúa seleccionando las áreas del mismo material según el contenido porcentual de dicho material en el área. Las operaciones de perforación y tronadura en las áreas del material remanente se inician cuando se hayan tronado todas las áreas del material inicialmente de interés o cuando éstas no sean accesibles.

En el presente trabajo se consideró únicamente el tipo de material (estéril o mineral) que conforma el bloque, sin tomar en cuenta la ley de los mismos ni la dilución producto de la tronadura.

Las Figuras 13 y 14 indican las secuencias de perforación y tronadura para los dos escenarios de distribución mineral estudiado.



## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El secuenciamiento de explotación de bancos mediante FMIPSC usa el modelo de optimización genérico del software UDESS. La función objetivo del modelo es minimizar el tiempo de extracción del banco y su formulación genérica se muestra en la sección de anexos.

El software recibe como entrada: actividades, sus precedencias y recursos asociados (costo, ingreso, tiempo de extracción, etc.) y genera un agendamiento de las actividades en el tiempo respetando las precedencias entre actividades y restricciones de capacidad. La creación de actividades, precedencias y restricciones se especifican a continuación.

### 4.1.3 Actividades UDESS, formas de extracción y precedencias

El archivo de entrada (.xls) contiene la distribución espacial de los bloques del área de perforación y tronadura o de la sección del banco que se estudia. Los bloques toman un valor de 1 si es del material de interés en el agendamiento, 0 si es del material que se desea evitar o dejar remanente y un valor de -1 si el bloque ya ha sido extraído en agendamientos anteriores.

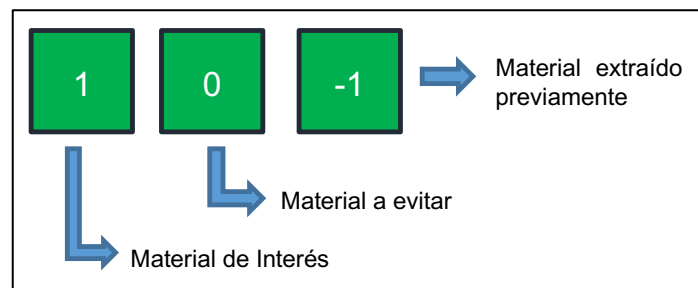


Figura 15 Valorización de los bloques en el modelo

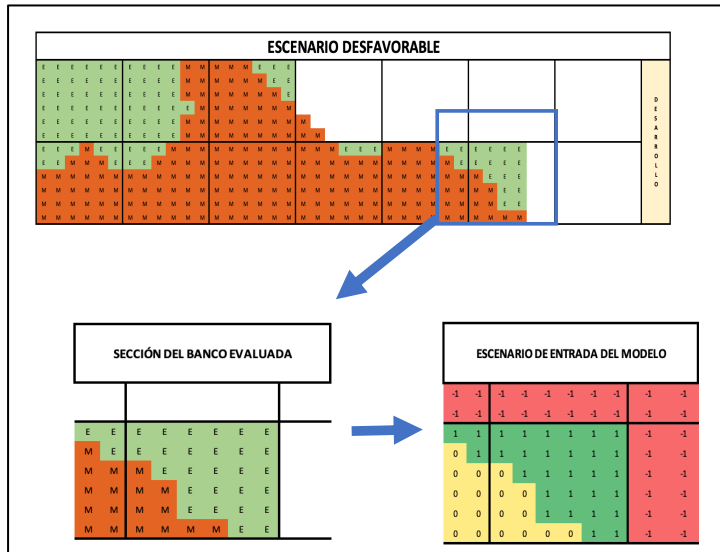


Figura 16 Ejemplo de archivo de entrada del modelo

Cada actividad agendada por el modelo está constituida por un par de bloques de material y su valor es la suma de los valores individuales de los bloques que componen dicha actividad.

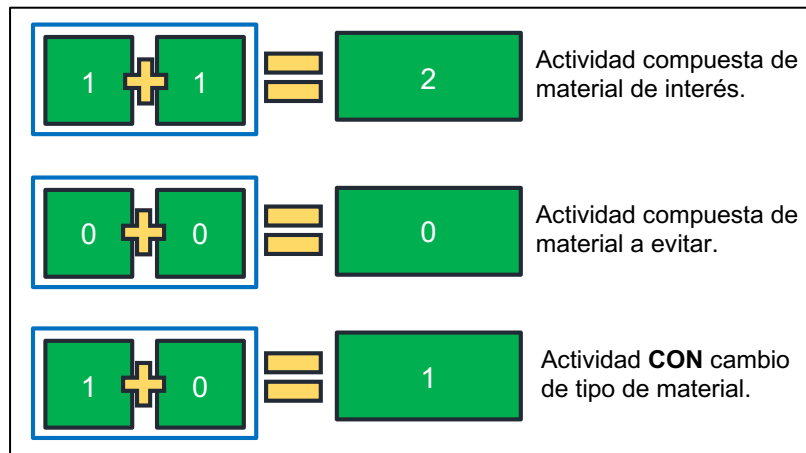


Figura 17 Valorización de actividades en el modelo

Las actividades se generan a través de un código Python que agrupa bloques tanto en orientación longitudinal como transversal al banco. Un mismo bloque puede formar parte de hasta dos actividades, por lo que no considera todos los agrupamientos posibles, siendo esto una limitante del modelo. La Figura 18 muestra un ejemplo del agrupamiento de los bloques en un banco de 16 bloques.

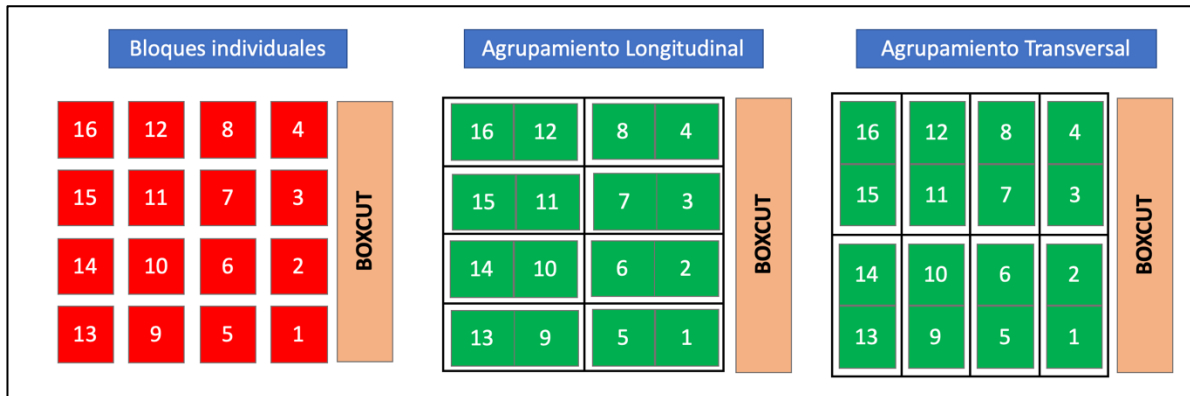


Figura 18 Ejemplo de agrupamiento de actividades en el modelo

Las actividades pueden ser extraídas de dos formas generales como desarrollo (material empotrado) o producción dependiendo del espacio operacional disponible para la extracción, y estas, a su vez, se subdividen según la dirección de la explotación (norte, sur, este u oeste) y la orientación de la actividad con respecto al banco (longitudinal o transversal).

Las formas de extracción se modelan mediante restricciones de precedencia. Los bloques precedentes a una actividad tienen que haber sido extraídos previamente creando el espacio operacional necesario para extraer dicha actividad de una forma en particular.

Las Figuras 19, 20 y 21 muestran los bloques precedentes de una actividad para las formas de extracción posibles.



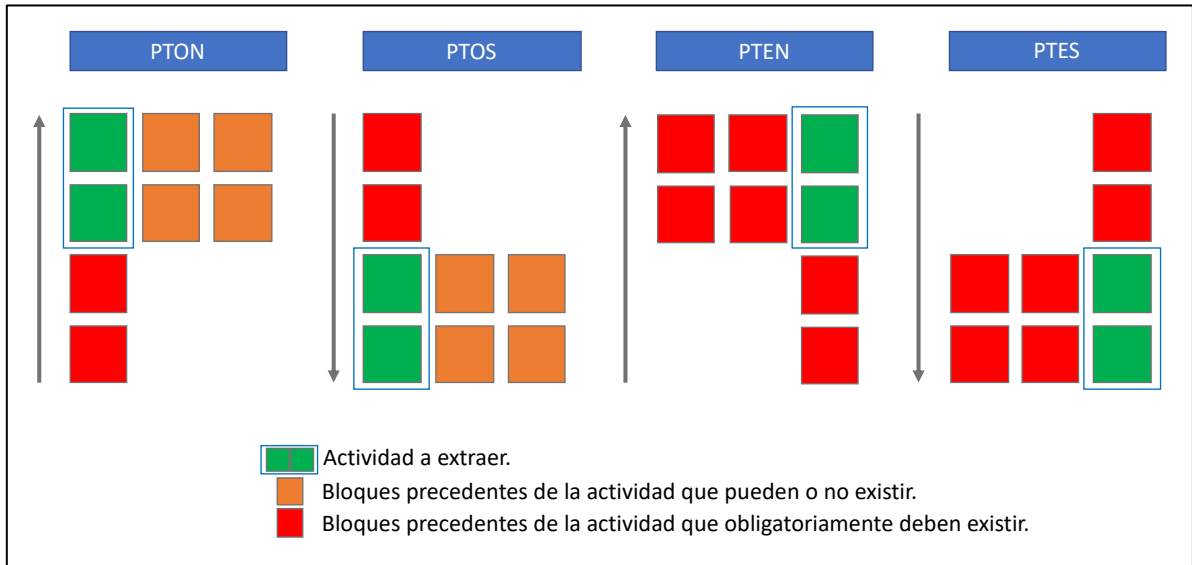


Figura 19 Formas de extracción de producción transversales. Dirección oeste-norte (PTON), oeste-sur (PTOS), este-norte (PTEN) y este-sur (PTES)

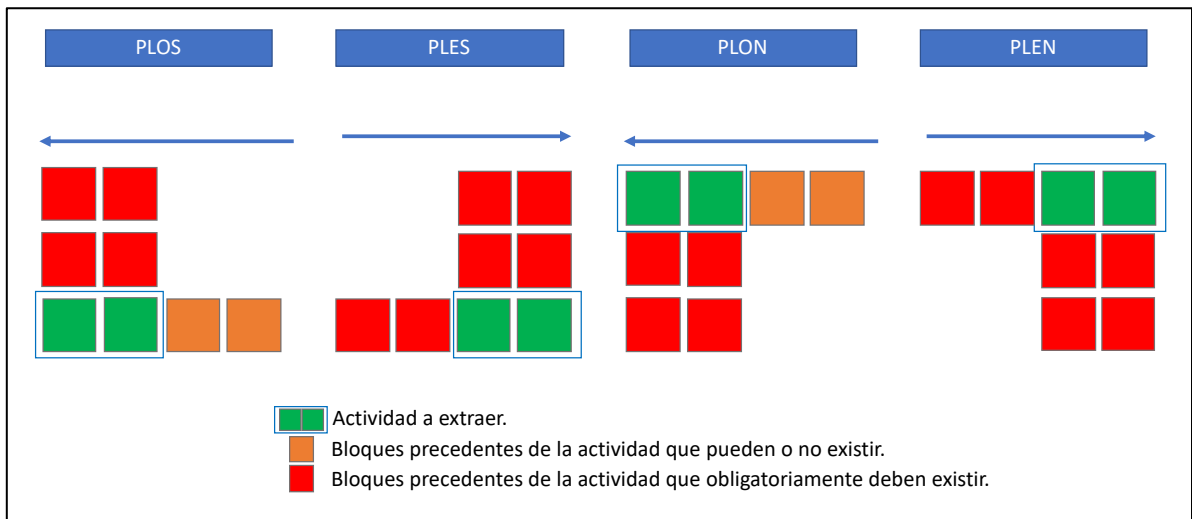


Figura 20 Formas de extracción de producción longitudinales. Dirección oeste-sur (PLOS), este-sur (PLES), oeste-norte (PLON) y este-norte (PLEN)

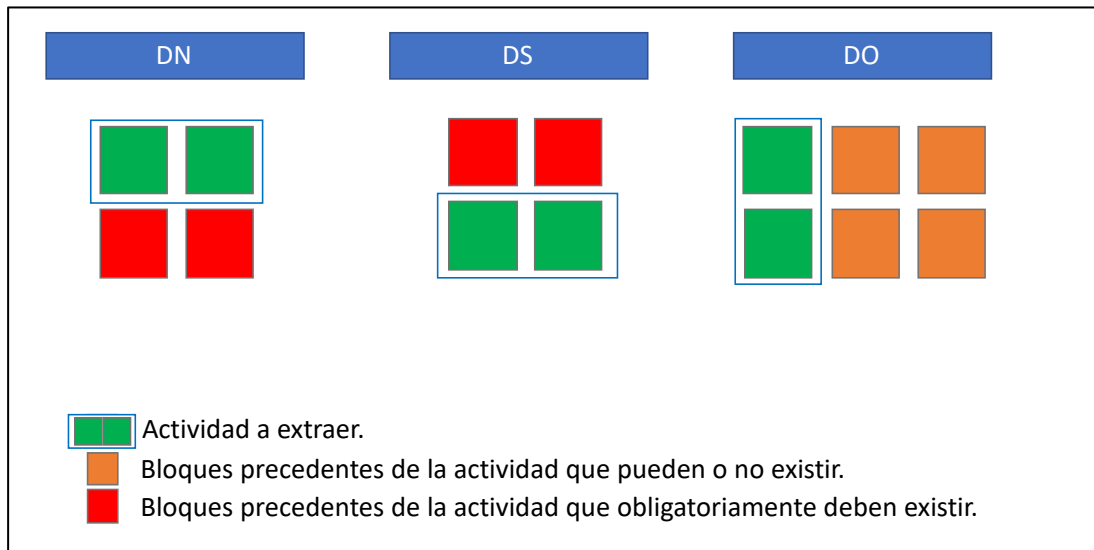


Figura 21 Formas de extracción en desarrollo. Dirección norte (DN), sur (DS) y oeste (DO)

Cada forma de extracción tiene un tiempo de extracción asociado, calculado a partir de los resultados de rendimiento del equipo obtenidos en la simulación. Estos tiempos de extracción se penalizan para actividades que contienen bloques con tipos de material diferentes o solamente bloques del material a evitar. Esto permite que se priorice la extracción de los bloques del material de interés, evitando cambios recurrentes en el tipo de material extraído.

$$t_a = \frac{R_f}{Ton_a} \cdot Km_a$$

Donde:

- $t_a$  = tiempo de extracción de la actividad a.
- $R_f$  = Rendimiento del equipo al operar una forma de extracción f.
- $Ton_a$  = tonelaje de la actividad a.
- $Km_a$  = variable de penalización por tipo de material contenido en la actividad a.

Para la implementación del modelo se tomaron ciertas consideraciones y restricciones que se detallan a continuación:

- **Restricción de Capacidad:** limita el número de actividades (pares de bloques) que el equipo puede extraer por periodo de tiempo evaluado (horas, turno, días,

etc.) dada su capacidad.

- Todas las actividades de interés deben ser extraídas a lo largo del periodo de tiempo evaluado.
- Cada bloque puede ser extraído solamente una vez y, por lo tanto, de una sola forma de extracción.
- Los bloques con valor -1 (extraídas en secuenciamientos previos) tendrán un tiempo de extracción de 0 y deben ser extraídos en el primer periodo. Ya que estos bloques solo representan el espacio disponible para la ubicación de los equipos al inicio del agendamiento.
- La simulación de la secuencia resultado del modelo considera que las áreas de perforación y tronadora o secciones del banco que contengan un solo tipo de material son extraídas mediante la secuencia de extracción más productiva encontrada.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ARTÍCULO: Simulation and Optimization of Bench-Mining Sequences using Fully Mobile In-Pit Sizer and Conveyor Systems.

#### Simulation and Optimization of Bench-Mining Sequences Using Fully Mobile In-Pit Sizer and Conveyor Systems

Josué González and Nelson Morales

*Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile*

#### ABSTRACT

In-Pit Crusher and Conveyor Systems (IPCC) have received an increasing interest in the mining industry due to the reduction in haulage costs, lower personnel and fuel requirements, and less environmental impact in comparison with traditional truck-shovel operations. However, contrarily to the usual shovel-truck case, there is not a well-established methodology for planning IPCC extractions and, in particular to analyze the optimal bench extraction sequence.

In this paper, a methodology to evaluate Fully Mobile In-pit Sizer and Conveyor System's (FMIPSC) application and performance is proposed. The FMIPSC system configuration is modelled using discrete-event simulation to assess its productivity, availability, utilization, and its interference with drilling and blasting stages. We analyzed different loading methods such as back-up (single and double sided), drive-by and fixed crusher loading methods and they were combined into two mining sequences.

The methodology proposed may be usefully implemented to analyze the behavior of FMIPSC systems and optimize its performance, through combining high productive loading methods into longitudinal and transversal mining sequences applied to different bench sizes scenarios.

According to the numerical experiments conducted, the drive-by method was the most productive of the loading methods due to shovel's lower average swing angle and less conveyor relocations. However, its application requires lateral areas to be previously mined due to space requirements to sizer and conveyor allocation. The fixed crusher and back-up methods can be applied to carry out these mentioned areas and box cut.

Simulation's results demonstrates that as wider benches are mined combinations of loading methods could be made, increasing the productivity of the system and enabling the possibility of mixed sequences where selective mining could take place.

## **INTRODUCTION**

The uncertainty in the prices of minerals, the high price of fuels, and increasing operational costs, mainly haulage costs due to the deepening of the pit, have made the use of In-pit Crushers and Conveyor Systems (IPCC) one of the most intriguing alternatives for mining companies to reduce these costs and remain competitive.

IPCC systems may have different configurations, chosen according to the production requirements of the mining company and the characteristics of the mineral deposit. Depending on the crusher used, the IPCC systems can be classified into fixed, semi-fixed, semi-mobile and fully mobile (Oberrauner et al., 2012). In this paper, a Fully Mobile Sizer and Conveyor System (FMIPSC) configuration is modelled which integrates a high capacity rope shovel that discharges the material directly into the hopper of a double roll mobile crushing unit. Once the material has been crushed it is transported using a conveyor system that includes a horizontal conveyor and a set of super portable conveyors.

The FMIPSC's productivity is limited by the shovel's performance. Therefore, the system's highest productivity is reached by implementing loading methods where the shovel completes low average swipe angles to feed the sizer unit, hence achieving short loading cycles. The relocation frequency also impacts the productivity of the system and it is dissimilar for each loading method. It is defined as the number of advances that the shovel and sizer make before the horizontal conveyor must be moved. The placement and movement of the shovel around the sizing unit directly impacts the average swing angle. Therefore, an excavator moving in arc will be able to excavate a wider bench at a lower average swing angle than the same equipment placed in a fixed position (Atchison, 2011).

Due to the complexity of the system discrete-event simulation (DES) is used. DES has been widely applied to model mine operations where deterministic models fail to predict uncertain behavior accurately (Upadhyay & Askari-Nasab, 2017). This tool is extensively accepted to assess the performance of mine operations because it makes it possible to incorporate inherent variability and complexity of operational uncertainty (Torkamani & Nasab, 2015). In this research, DES is used to estimate operational indexes as productivity, availability, utilization, and the operational interferences between parallel mining operations.

This work aims to propose a methodology to evaluate the application of FMIPSC systems and maximize their productivity. Evaluating different configuration of loading methods and mining sequences applied to dissimilar bench sizes scenarios using DES. It is important to mention that, in this research, mining benches are conformed completely of ore material. Geological uncertainty in terms of material type and ore grade were not considered. FMIPSC's behavior applied to varied mineral distribution scenarios will be evaluated in future work.

**METHODOLOGY**

The methodology used for this research is summarized in Figure 22. The simulation model replicates the FMIPSC system's behavior. The input for the simulation is a plan that includes the allocation coordinates of the shovel, sizer, and conveyor system; and loading, dumping, and discharge coordinates for each position of the equipment on the bench. The model uses probability density distribution for event occurrence and its corresponding duration. The information of capacity, breakdown frequency, mean time to repair, and other technical data are collected from bibliographic review and interviews with engineers experienced in FMIPSC systems.

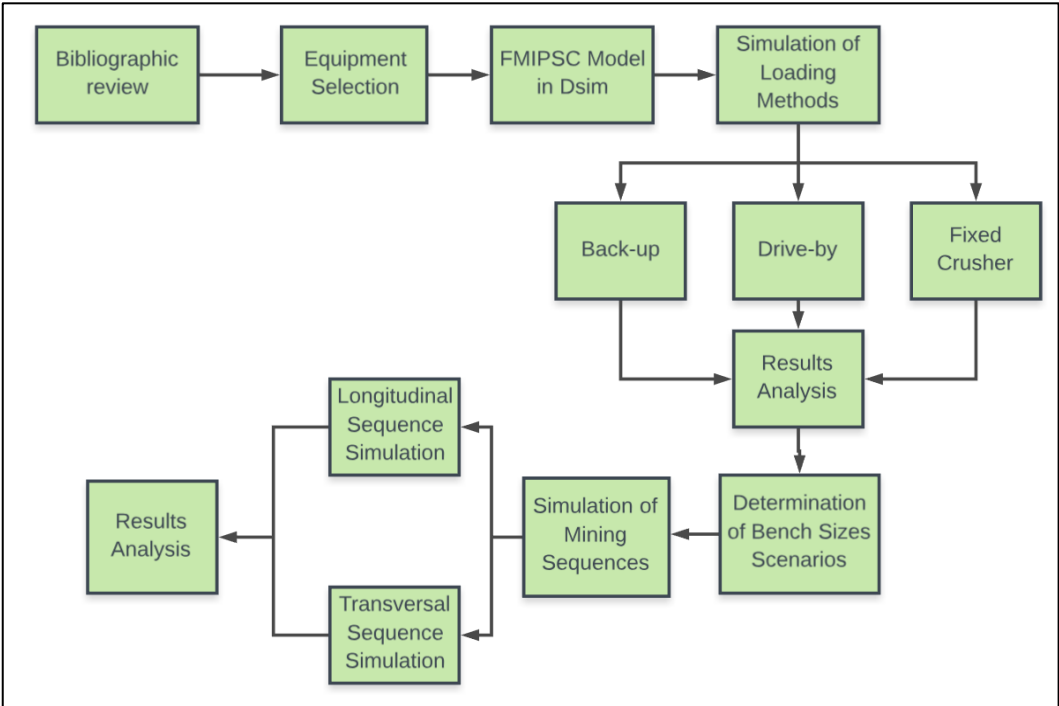


Figura 22 Artículo. Methodology scheme

## NUMERICAL EXPERIMENTS

### FMIPSC EQUIPMENT

The equipment selected for this study includes a P&H 4100XPC electric cable shovel as loading equipment, an MMD mobile crushing station, a super portable conveyor system from Terra Nova Technologies (TNT), and a Caterpillar MD6540 drilling machine.

The P&H 4100XPC electric rope shovel has a bucket nominal capacity of 52.8 to 62.7[m<sup>3</sup>] achieving an estimated 99 to 110[t] per loading cycle. Given the dimension of floor level radius of 16[m] and a digging radius of 22[m], considering a bench height of 15[m], it allows the shovel to mine a 6[m] advance. (Komatsu, n.d.)

The MMD mobile crusher unit incorporates a 1500 MMD series twin shaft mineral sizer with an average capacity of 9,000[tph], a receiving hopper of 175[m<sup>3</sup>] capacity, and a transfer and discharge conveyor. It is designed to be a compact and light-weight unit (44[m] x 15[m] x 14.5[m] / 1170tons) reaching speeds of 12[m/min]. (Mining Machinery Developments (MMD), n.d.)

Terra Nova Technologies super portable conveyor system includes an 86m-long horizontal conveyor with a full-length receiving hopper, which allows the sizer unit to discharge material at any point on the conveyor; and a set of 13 interchangeable super portable conveyors mounted on tracks, each one of 76[m] long and fully adaptability to horizontal conveyors. These super portable conveyors were designed to replace shiftable conveyors (Figure 23) that are placed at the face of the bench and need to be moved several times by a dozer to relocate, reducing downtime. (Terra Nova Technologies, n.d.)

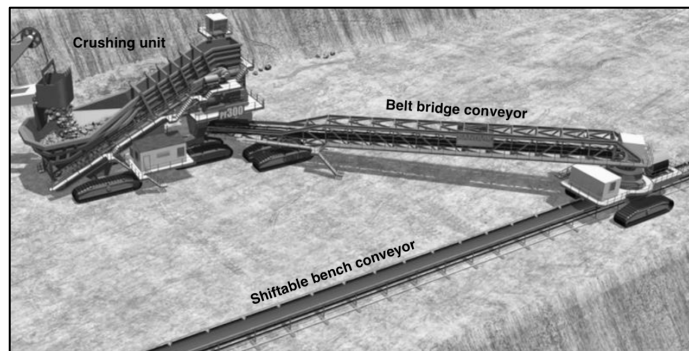


Figura 23 Artículo. Fully mobile crushing and conveyor system (Oberrauner et al., 2012)

## Loading Methods

The loading methods evaluated include back-up (single and double-sided), drive-by and fixed crusher loading methods, which are described below. Parameters like fill factor, operator efficiency, swipe factor, and swell factor are considered to estimate the effective bucket capacity for copper ore. Safety distances between the FMIPSC system's equipment to the bench wall or/and pit are respected to ensure the correct maneuverability and operation of the system.

### Back-up Loading Methods

This loading method has two variants: single and double sided. In the single-sided method the horizontal conveyor is placed behind the shovel while the sizer is located on one side of the shovel slightly behind it (Figure 24).

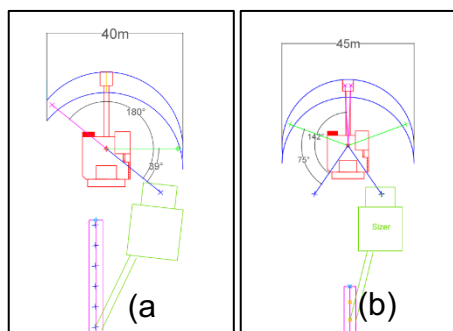


Figura 24 Artículo. Back-up loading method. (a) single sided (b) double sided

The shovel rotates  $40^\circ$  to  $180^\circ$  to complete the loading cycles in a 40[m] width working face. The double-sided method allows to reach a 45[m] operational width using the entire shovel's digging radius Figure 24 (b). The equipment has the same allocation as the single sided alternative, however, in this alternative just half of the working face's material is extracted by the shovel while performing  $75^\circ$  to  $145^\circ$  swipe angles, then, the sizer moves to the opposite side of the shovel and the process is repeated.

### Drive-by Loading Methods

Drive-by methods are generally applied to long and straight benches where shovel and



sizer have parallel trajectories to each other and move parallel to the bench face (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, n.d.). Two operational widths are evaluated for this method, 20[m] and 24[m], respectively. The shovel rotates 35° and 98° (Figure 25 a and b) to complete the loading cycles. It is important to mention that these methods require lateral areas (developments are shown in yellow, Figure 26) to be previously mined to allocate the sizer and the conveyor system.

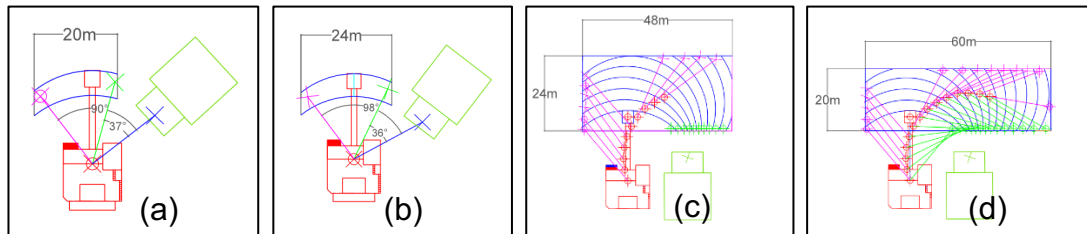


Figura 25 Artículo. Drive-by loading methods (a) 20m working face width (b) 24m working face width. Fixed crusher loading methods (c) 48m working face width (d) 60m working face width

## Fixed Crusher Loading Methods

Two alternatives are evaluated for this method where the shovel excavates 48[m] x 24[m] and 60[m] x 20[m] blocks (Figure 25 c and d) while performing 30° to 165° rotations to load the sizer unit along the arc movement around it and followed by the borders extraction where remnant material has been left behind.

## Bench Size Scenarios and Mining Sequences

Depending on spacing requirements different loading methods can be applied to the box cut, lateral developments, and production areas within the bench, and they can be combined into longitudinal and transversal mining sequences to improve the overall productivity of the FMIPSC system. The simulation model incorporates drilling and blasting events. The extraction operations need to stop in order to move the equipment to a safe area so blasting can take place, affecting the utilization of the system. Drilling and blasting plans require a distance of 120[m] between the equipment and the blasting area to ensure safety. Blasting parameters were calculated by Lopez Jimeno methodology (Instituto Tecnológico GeoMinero De España, 1994) using a drill diameter of 311[mm].

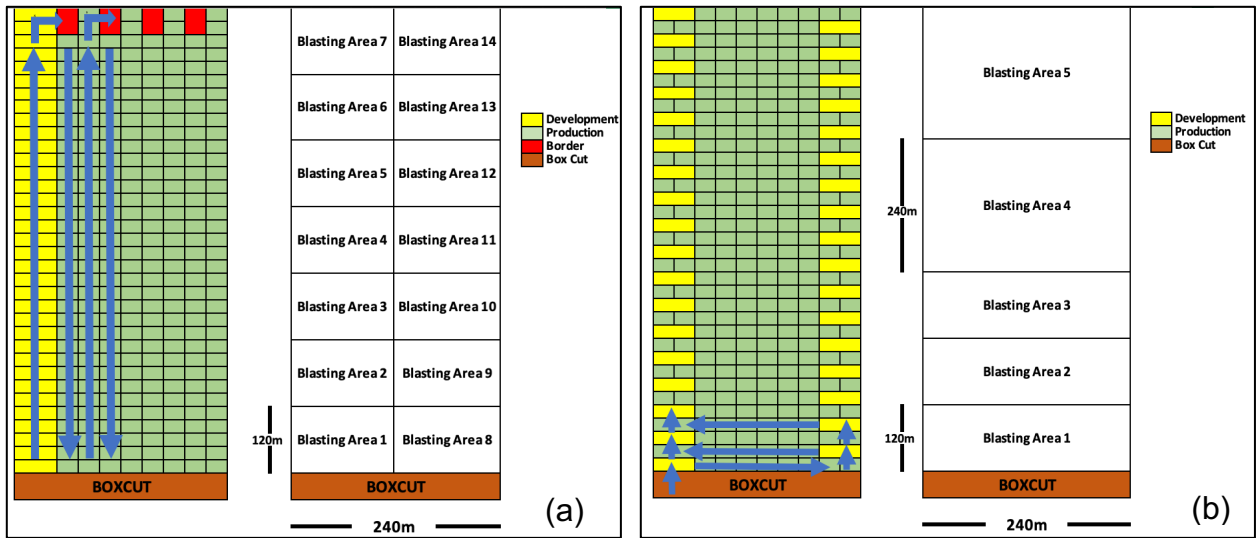


Figura 26 Artículo. Bench mining and blasting plans sequences. (a) longitudinal sequence (b) transversal sequence

Two scenarios of bench sizes are evaluated considering a constraint in the number of super portable conveyors available per bench a total of 13 super portable conveyor. The first bench scenario has a bench width of 120[m] and a length of 1000[m], and the second has a width of 240[m] and a length of 880[m]. A 120[m] bench is the minimum width necessary to allocate the shovel, sizer unit, and horizontal conveyor and allow the extraction of the bench by the FMIPSC system.

## Model Inputs

The simulation inputs about event distribution were mainly obtained from Morriss (2008), and adapted to a triangular probability density distribution, according to the criteria of the mine planning engineers. Table 3 and 4 show the data used for each programmed event simulated. Blasting and equipment's maneuver delays are results from the simulation to assess the utilization of the FMIPSC system.

Equipment	Units	MTBF			MTTR		
		Minimum	Maximum	Mode	Minimum	Maximum	Mode
Shovel	hrs	20	26	22.4	1.6	2.2	1.8
Crusher	hrs	19	25.1	20.7	0.6	1.5	0.8
Horizontal Conveyor	hrs	20	26	21.7	0.4	1	0.5
Drill	hrs	51	53.3	52.1	1.8	2.5	2.2

Tabla 3 Artículo. Failure event distribution

<i>Event</i>	<i>Units</i>	<i>Triangular distribution</i>		
		<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Mode</i>
<i>Shift Change</i>	min/shift	9.8	10.2	10
<i>Meal break</i>	min/shift	50	70	60
<i>Geological Inspection</i>	min/day	18	22	20
<i>Fuel *</i>	min/day	12.5	17.5	15
<i>Equipment Inspection</i>	min/shift	8	15	10
<i>Re-Induction</i>	min/week	25	35	30
<i>Other delays</i>	min/week	10	20	15
<i>Bad weather losses</i>	days/year	2	4	3
<i>Scheduled relocations</i>	min/week	10	20	15
<i>Industrial losses</i>	days/year	3	5	4
<i>Daily Service</i>	hrs/day	0.8	1.2	1
<i>Weekly Maintenance</i>	hrs/week	6.2	6.8	6.5
<i>Shovel and Drill</i>	hrs/year	2.7	2.9	2.8
<i>Annual Maintenance</i>	hrs/year	5.5	5.7	5.6

\*Non-electric equipment only

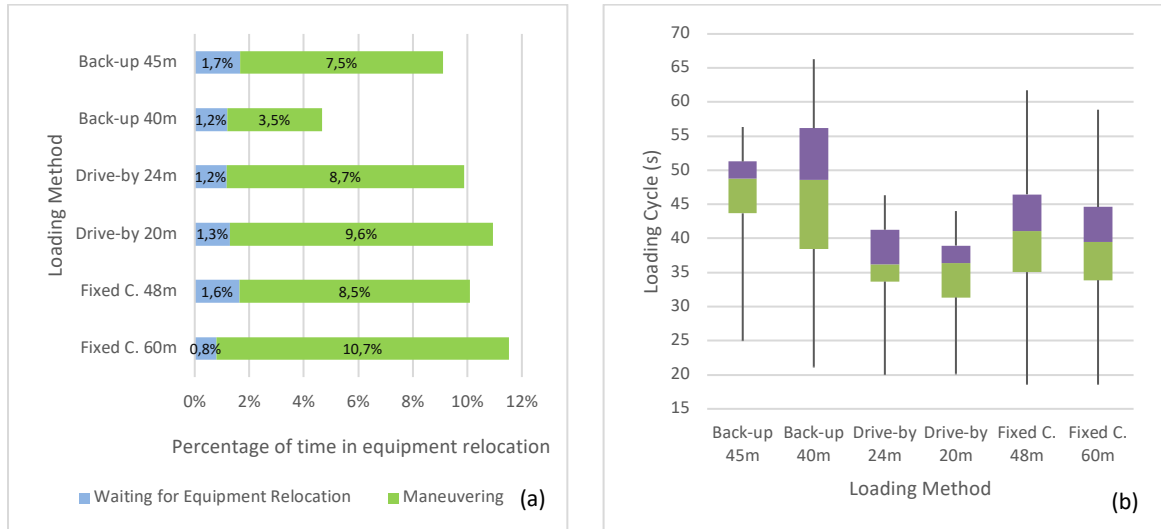
**Tabla 4 Artículo. Cyclical event distribution**

## RESULTS AND DISCUSSION

One hundred simulation replicas were run in order to obtain accurate results. Each replica running time was approximately 6 to 10 minutes.

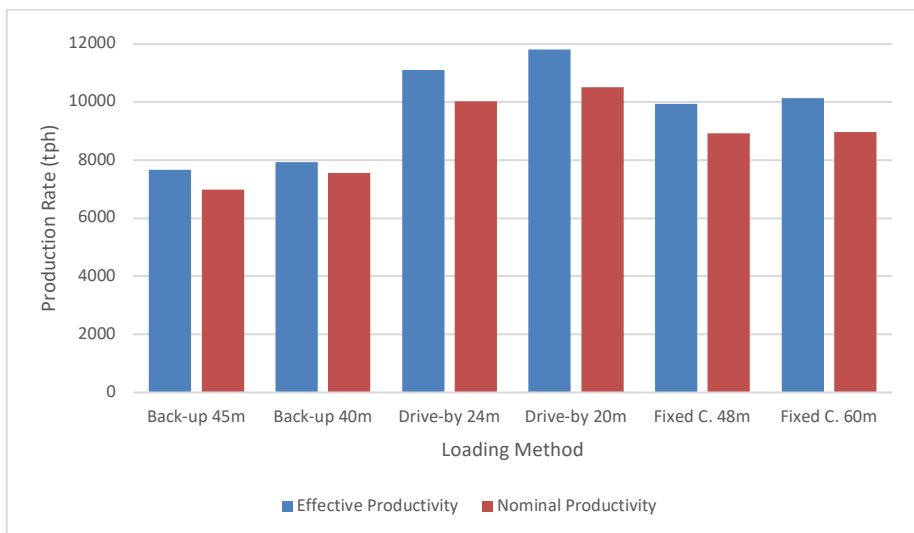
### Loading Methods

The results presented in Fig. 27 (a) indicate the percentage of time that the shovel and sizer are maneuvering or waiting for the conveyor system to relocate, and the Fig. 27 (b) shows the loading cycle times for each loading method evaluated. The results indicate that the single sided back-up methods have lower percentage time in equipment relocation with 4.7% while also having the highest average loading time. Its double-sided variant has a 4% increase in equipment relocation due to the time needed to move the sizer unit from one side of the shovel to the other. The drive-by methods have the lowest average loading cycle time with 35.6 and 37 seconds, the 20[m] width working face alternative has 10.9% of its time dedicated to equipment relocation when 4 meters wider working faces are excavated this percentage is reduced by 1%, and the average loading time increases by 1.5 seconds. The methods with the fixed crusher have the highest percentage of time allocated to equipment maneuvering due to the amount of movements performed by the shovel around the sizer unit. These methods have an average loading time of 40 seconds.



**Figura 27 Artículo. Loading methods simulation results. (a) percentage of time in equipment relocation (b) loading cycle time**

Figure 28 indicates the production rate of each loading method studied. Drive-by methods were found to be the most productive methods reaching 11,800[tph] followed by the fixed crusher method at 10,150[tph]. Even though the back-up methods have the lowest time in equipment relocation, they are the less productive methods due to the higher average loading times. Nominal production rates where the system's relocation time is considered follows the same order and tendency.



**Figura 28 Artículo. Production rate by method**

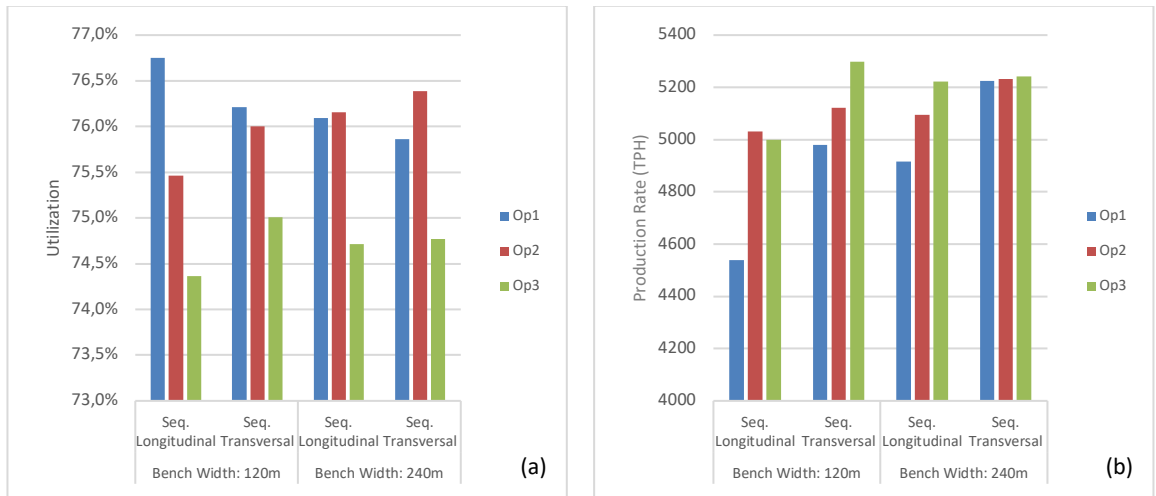
Due to the required developments needed to perform drive-by methods they cannot be implemented on their own in a mining sequence, so it is required to combine them along with back-up or fixed crusher methods. Table 5 shows the best combination of loading methods that can be applied based on the production rates obtained from the loading methods simulations. Three options are evaluated for two bench size scenarios, option 1 combines back-up single sided and drive-by methods, option 2 and 3 combine fixed crusher and drive-by method with different working face widths.

	Number of Strips Extracted					Bench Width (m)	Average Production Rate (tph)
	Back-up 40m	Drive-by 20m	Drive-by 24m	Fixed C. 48m	Fixed C. 60m		
Option 1 (back-up & drive-by)	1	4				120	10,516
Option 2 (fixed crusher & drive-by)			3	1		120	10,642
Option 3 (fixed crusher & drive-by)		3			1	120	10,977
Option 1 (back-up & drive-by)	1	10				240	11,161
Option 2 (fixed crusher & drive-by)			8	1		240	10,878
Option 3 (fixed crusher & drive-by)		9			1	240	11,391

**Tabla 5 Artículo. Loading methods combination options**

## Mining Sequences

Results of the simulations of the mining sequences applying the aforementioned combinations to two bench size scenarios are showed in Figure 29. It is important to mention that the same availability of the system is considered for all options, bench scenarios, and sequences because the model uses the same failure distribution and programmed maintenance frequency in all the simulations. The average value of availability estimated at 72.7%. Other cyclical events such as meals, shifts changes, geological inspections, and equipment inspections are also similar, averaging all the replicas of each alternative simulated. Having said this, the system's utilization is only affected by the relocation time of the equipment and blasting delays.



**Figura 29 Artículo. Simulation results. (a) FMIPSC utilization (b) FMIPSC production rate**

The system's utilization for option 1 is the highest due to the lower equipment relocation time of the back-up loading methods. In this option the utilization declines while the size of the bench increases, since more of the bench's tonnage is extracted by drive-by methods where the relocations are more frequent, but it increases productivity. In options 2 and 3 (longitudinal) utilization increases as wider benches are mined because of the longer maneuvering times of the fixed crusher methods are countered by drive-by method's shorter movement times. The opposite happens with option 3 using a transversal sequence in a 120[m] width bench where the horizontal conveyor only needs to be relocated once after the complete transversal strip has been mined, making of it the most productive option at 5,298[tph].

The simulation's results demonstrate that transversal mining sequences are more productive than longitudinal sequences due to less equipment maneuvers and the elimination of the border areas in the back of the bench that are created with longitudinal sequences. As wider benches are mined a larger percentage of material is extracted using drive-by methods, increasing the FMIPSC system's productivity until it potentially approximates to the drive-by methods average productivity.

## CONCLUSION

In conclusion, FMIPSC's are one of the most interesting alternatives to be implemented as material handling system due to its reduced operative costs, high productivity, and less fuel and personnel requirements.

Drive-by methods are the most productive of the loading methods evaluated, however, its application requires previous developments due to spacing requirements. The fixed crusher methods are the best option to carry out these developments.

As wider benches are mined the system's average productivity increases approaching to the productivity of the drive-by methods since a bigger part of the bench is mined by this higher productive method.

It was found that the methodology proposed may be usefully implemented to analyze the behavior of FMIPSC systems and optimize its performance, through combining high productive loading methods into longitudinal and transversal mining sequences applied to different bench sizes scenarios.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

Conicyt basal project FB0809

## **REFERENCES**

- Atchison, T. (2011). In-pit crushing and conveying bench operations. *Coal International*, 259(5), 35–40.
- España, I. T. G. de. (n.d.). *Manual de Carga, Arranque y Transporte en Minería a Cielo Abierto*.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1994). *Manual De Perforacion Y Voladura De Rocas*.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (n.d.). *Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto*.
- Komatsu. (n.d.). *Especificaciones Generales de la Pala Eléctrica de Minería P&H 4100XPC*. Retrieved from <https://mining.komatsu>
- Mining Machinery Developments (MMD). (n.d.). *Mmd sizers TM*. Retrieved from <http://www.mmdsizers.com>
- Morriss, P. (2008). Key Production Drivers in in-Pit Crushing and Conveying (Ipcc) Studies. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (Surface Mining 2008)*, 33.
- Oberrauner, A., Turnbull, D., & Systems, S. M. (2012). *Essentials on In-Pit Crushing and Conveying (IPCC)*, 102, 13.
- Terra Nova Technologies. (n.d.). *In-Pit Crushing and Conveying \_ Terranova Technologies*. Retrieved from <http://www.tntinc.com/equipment/inpit>
- Torkamani, E., & Nasab, H. A. (2015). A linkage of truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete-event simulation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 6(2), 97.
- Upadhyay, S. P., & Askari-Nasab, H. (2017). Dynamic shovel allocation approach to short-term production planning in open-pit mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–20.

### 5.1.1 Anexo Artículo: Resultados de simulación de secuencias de explotación de bancos mediante FMIPSC en bancos de 360m de ancho

Experimentos adicionales contemplan la simulación de la extracción de un banco de 360[m]x760[m], empleando las opciones de extracción (Tabla 6) analizadas anteriormente. Estos experimentos se realizan con la finalidad de cuantificar la variación del rendimiento del sistema al modificar el tamaño del banco.

La Figura 30 ilustra los resultados de las simulaciones en términos de rendimiento y utilización del sistema FMIPSC, comparándolas con los resultados de las simulaciones de las mismas opciones de extracción en bancos con 120[m] y 240[m] de ancho.

	<b>Desarrollo</b>	<b>Producción</b>
<b>Opción 1</b>	Carga en retroceso 40[m]	Carga en conducción 20[m]
<b>Opción 2</b>	Carga con chancador fijo 48[m]	Carga en conducción 24[m]
<b>Opción 3</b>	Carga con chancador fijo 60[m]	Carga en conducción 20[m]

Tabla 6 Opciones de combinaciones de métodos de carguío

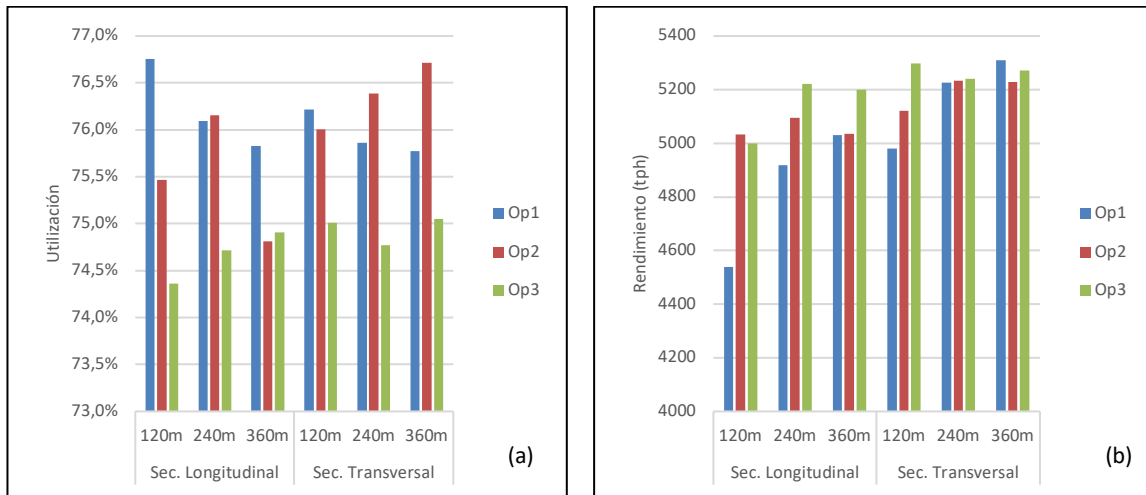


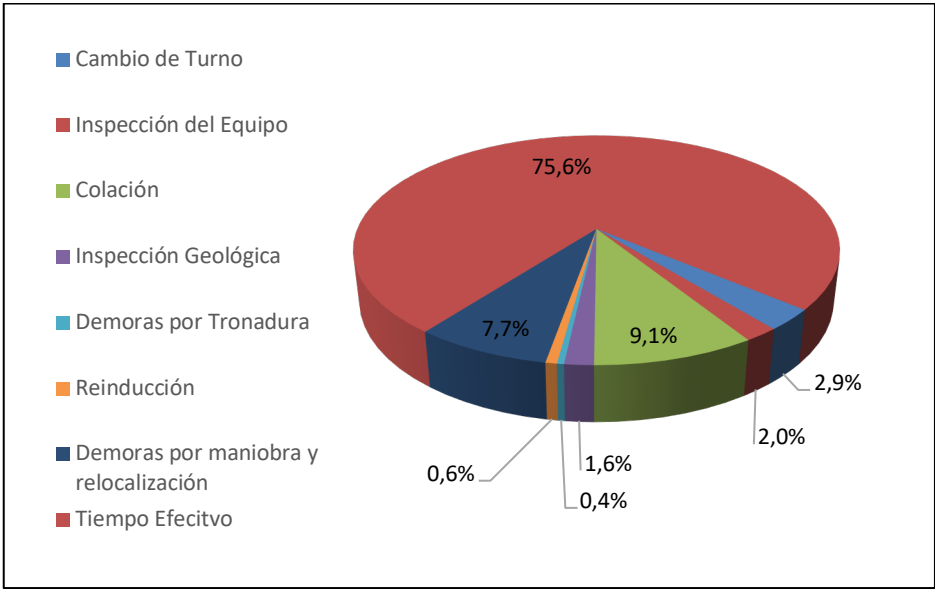
Figura 30 Resultados de simulación. (a) Utilización del sistema (b) Rendimiento

De los resultados se puede observar que en general el rendimiento incrementa a medida que el tamaño del banco es mayor. Para la opción 3 el aumento del tamaño no afecta en gran medida el rendimiento. Para esta opción el rendimiento tiende a



estabilizarse para los bancos con mayor ancho, alcanzando 5,000[tph] siguiendo secuencias de extracción longitudinales y en 5,100[tph] en secuencias transversales. El máximo rendimiento alcanzado es de 5,300[tph] para la opción 3 siguiendo una secuencia de extracción transversal con un ancho de banco de 120[m], únicamente igualado por la opción 1 en un banco de ancho de 360[m]. Estos rendimientos máximos alcanzados se dan debido a que en bancos estrechos (120[m]) con desarrollos anchos (60[m], opción 3) el chancador y las correas se mantienen más tiempo en una posición fija y la necesidad de relocalización de las correas es mínima. Necesitando relocalizar los equipos solo a lo largo del banco en sentido de la explotación y no a lo ancho. Por otra parte, en bancos más anchos (360[m]) con desarrollos con ancho menores (40[m], opción 1) el tonelaje extraído como desarrollo es mínimo y se potencia de mayor medida los rendimientos de los métodos de carguío más productivos (en conducción) usados en las zonas de producción.

Los resultados de la simulación demuestran que las secuencias transversales son más productivas debido al menor tiempo de maniobra y a la eliminación de las zonas de borde en la parte posterior del banco existentes en las secuencias de explotación longitudinales. Siendo esto más evidente en la opción 1 donde las secuencias transversales son en promedio un 7% más productivas.



**Figura 31 Distribución de uso de tiempo disponible**

En la Figura 31 se muestran los porcentajes del tiempo disponible promedio empleado en los distintos eventos dentro de la simulación. Se puede observar que en promedio el

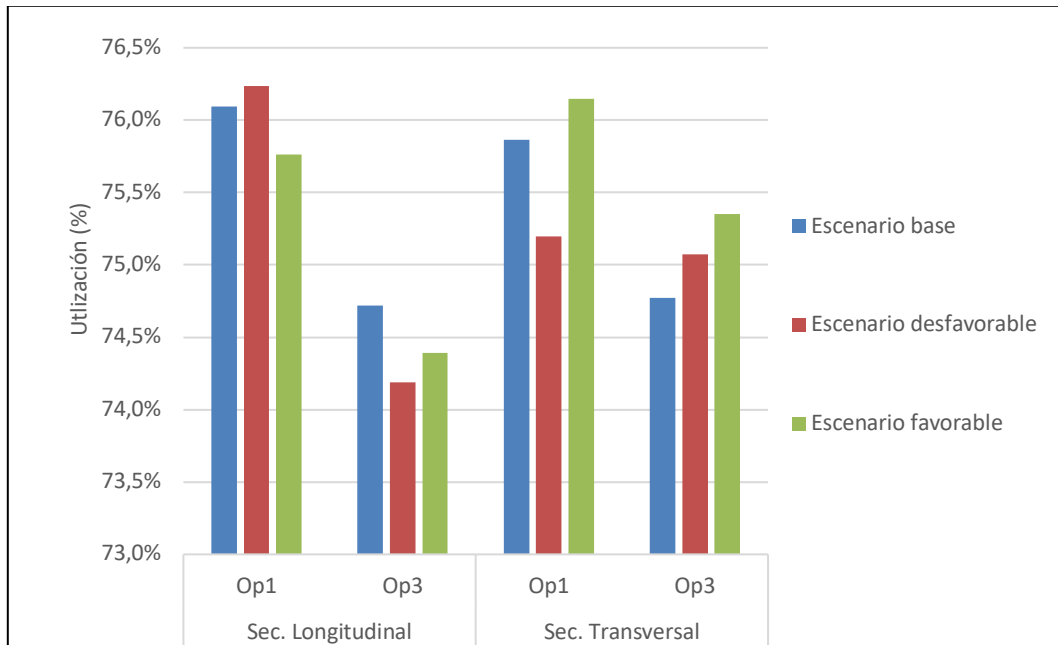
tiempo efectivo representa el 75.6% del tiempo disponible, mientras que el tiempo en maniobra y los eventos de tronadura el 7.7% y 0.4% respectivamente. De todas las simulaciones realizadas se obtuvo un promedio de disponibilidad de 72.6%. Dados estos valores se obtiene un total de aproximadamente 4,800 horas de trabajo efectivo al año.

## **5.2 EXPERIMENTOS ADICIONALES**

### **5.2.1 Simulación de secuencias de explotación de escenarios de bancos con distribución de mineral mediante sistemas FMIPSC**

Los experimentos pertenecientes a este apartado consideran la simulación de la explotación de bancos de 240[m] de ancho y 880[m] de largo, y dos escenarios de distribución de mineralización. Los escenarios son categorizados en escenarios favorables y desfavorables a partir de un análisis manual de contacto de bloques. El modelo de simulación considera eventos adicionales como las pausas requeridas para la limpieza de las correas transportadoras por el cambio en el tipo de material extraído. Estos experimentos se realizan con el fin de cuantificar el efecto del cambio de tipo de material extraído sobre los índices operacionales del sistema y la continuidad de alimentación de mineral a la planta de procesamiento.

En la Figura 32 se puede apreciar que el proceso de limpieza de las correas por cambio de material transportado no afecta significativamente la utilización del sistema. No existe una tendencia decreciente en términos de utilización del sistema entre la explotación de un escenario base (un tipo de material) y escenarios con distribución de mineral variable.



**Figura 32 Resultados de simulación de escenarios. Utilización del sistema**

En la Figura 33 se muestra el número de cambios de tipo de material extraído durante la explotación del banco. Se observa que en secuencias de explotación longitudinales el número de pausas por limpieza de las correas transportadoras es menor, ya que la distribución de la mineralización tiene mayor continuidad en esta dirección en el banco. El mayor número de cambios por tipo de material en el escenario desfavorable confirma una mayor discontinuidad en la distribución mineral para estos escenarios con aproximadamente un 30% más cambios que los escenarios considerados favorables. Un alto número de cambios en el tipo de material extraído representa una alimentación discontinua de mineral a la planta de procesamiento y es la problemática que se busca abordar mediante la implementación de un modelo de optimización para la secuencia de explotación de bancos.

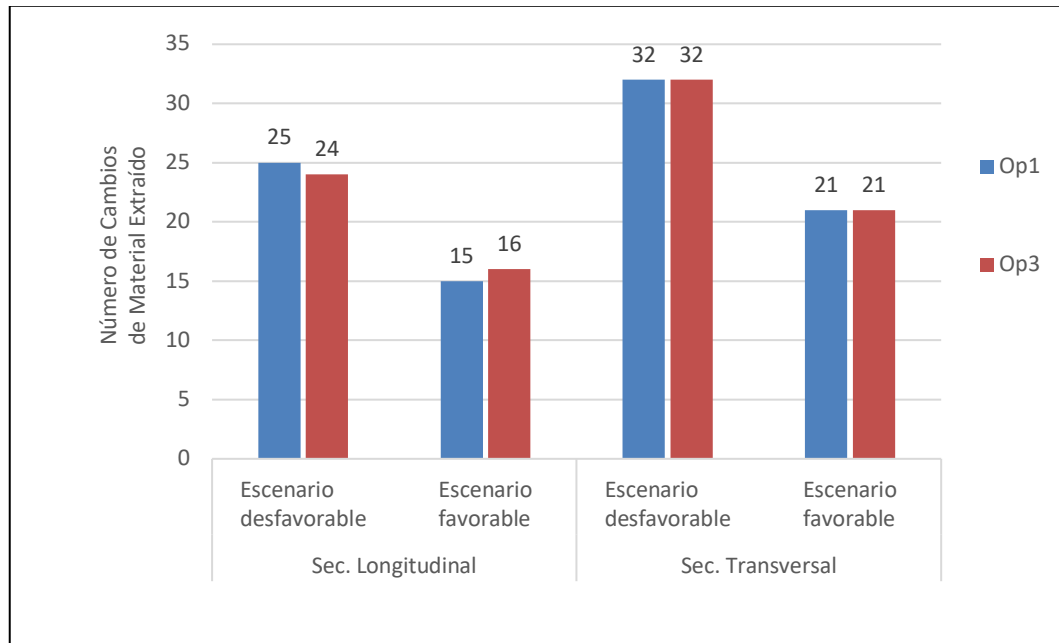


Figura 33 Resultados de simulación de escenarios. Número de cambios de tipo de material

## 5.2.2 Modelo de optimización de secuencias de explotación de bancos mediante FMIPSC

En este apartado se considera la implementación de un modelo de optimización para secuencias de explotación de bancos de 880[m] de largo y 240[m] de ancho para los escenarios de distribución de mineral previamente seleccionados. El objetivo del modelo es entregar una secuencia de extracción que maximice el rendimiento de los sistemas FMIPSC mientras se tiene la mayor selectividad posible en la extracción, garantizando de esta manera una alimentación de mineral continua a la planta de procesamiento.

El banco se divide en paños o áreas de perforación y tronadura de 120[m]x120[m], cuya secuencia de tronado es previamente seleccionada con el fin de minimizar, en lo posible, el número de cambios entre tipos de material extraído durante la extracción del banco.

Las actividades agendadas comprenden pares de bloques existentes en el banco, existiendo dos formas de extracción posibles: desarrollo (apertura de frente) y producción. Cada actividad puede ser llevada a cabo solamente de una de las formas de extracción posibles, dependiendo del espacio operacional y viabilidad de acceso a la misma, proporcionando una secuencia operacionalmente factible.

Las secuencias de extracción resultado del modelo se simulan para determinar los índices operacionales del sistema al ejecutar dicha secuencia optimizada y poder valorar el trade-off entre selectividad y rendimiento.

Los tiempos de extracción asociados a cada actividad según la forma que se extrae la actividad se muestran en la Tabla 7.

Forma de Extracción	Rendimiento Efectivo [tph]	Utilización [%]	Disponibilidad [%]	Rendimiento [tph]	Tonelaje Actividad	T_Extracción [hrs]
Producción	11,810	76%	72.5%	6507	31200	4.8
Desarrollo	7,935			4372		7.1

Tabla 7 Tiempos de extracción por forma de explotación de actividades

Para este caso de estudio se estableció una capacidad máxima extracción de una actividad de producción por cada periodo, es decir, 4.8hrs/periodo. Por lo tanto, las actividades que se explotan como desarrollo necesitan 1.5 periodos para ser extraídas. La capacidad elegida permite tener un agendamiento por actividad (pares de bloques) y tener una correcta apreciación de la orientación de la explotación.

Las Figuras 34 y 35 muestran la secuencia de explotación obtenidas para el modelo para los escenarios estudiados.

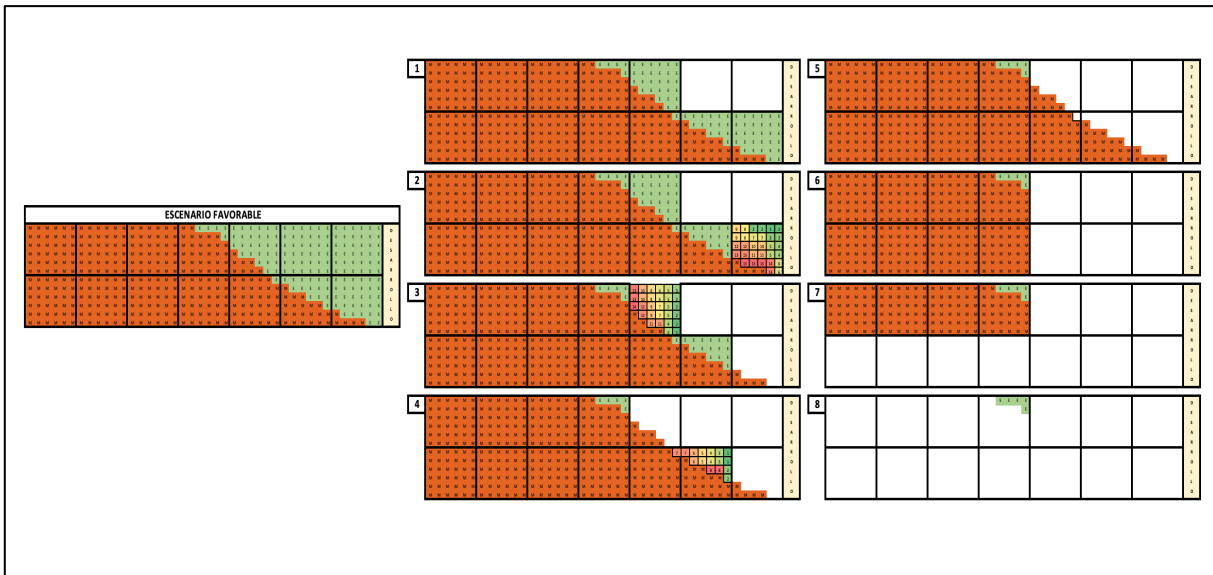


Figura 34 Resultados del modelo de optimización. Secuencia de explotación de escenario favorable

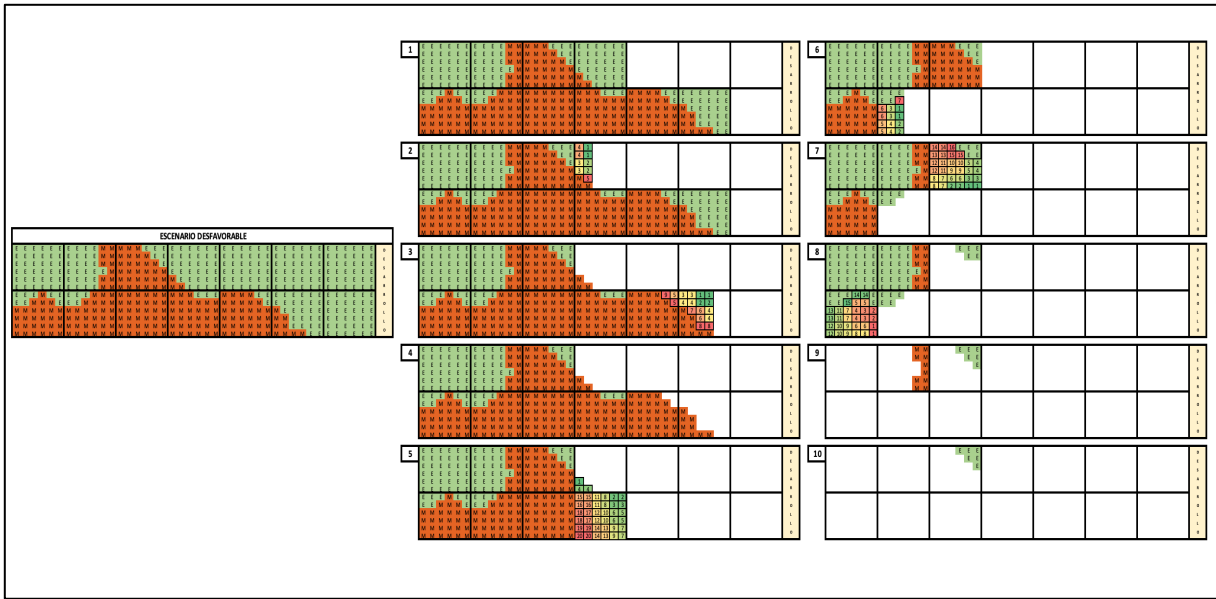


Figura 35 Resultados del modelo de optimización. Secuencia de explotación de escenario desfavorable

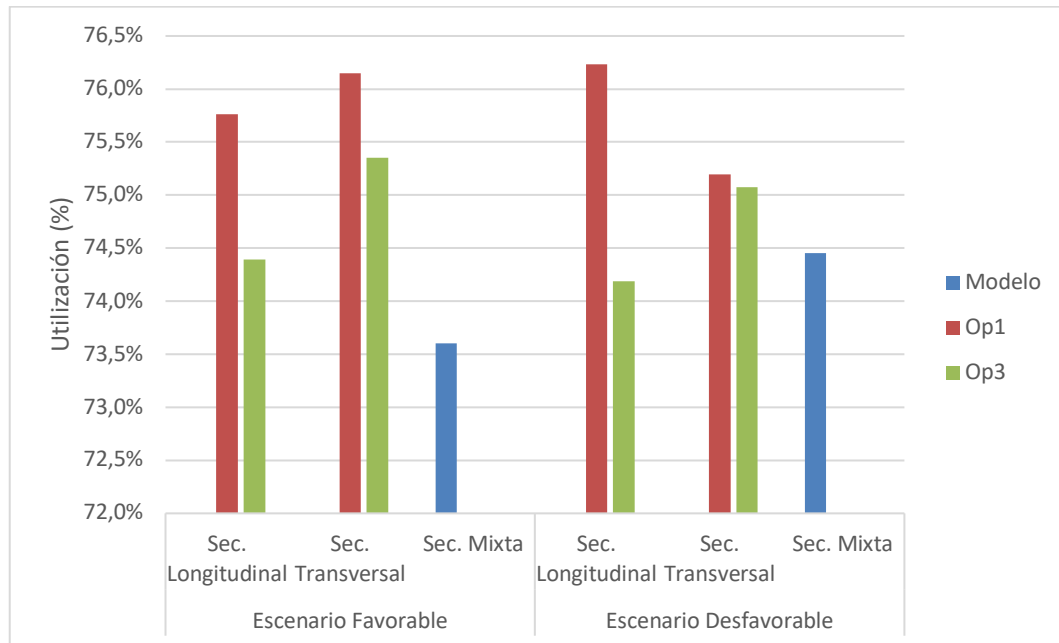
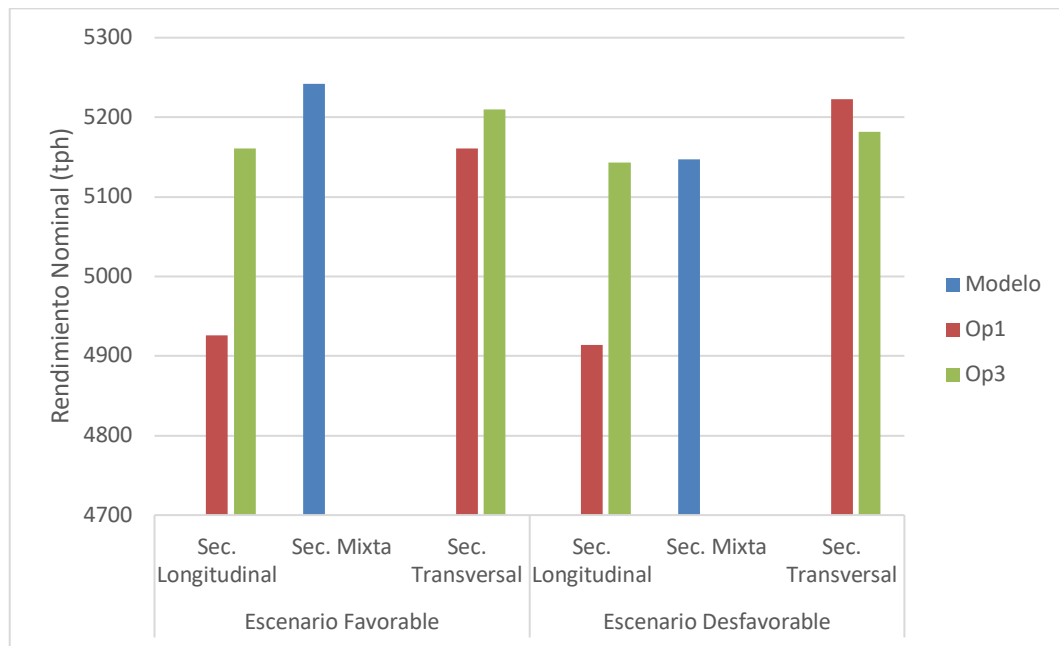


Figura 36 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Utilización del sistema FMIPSC

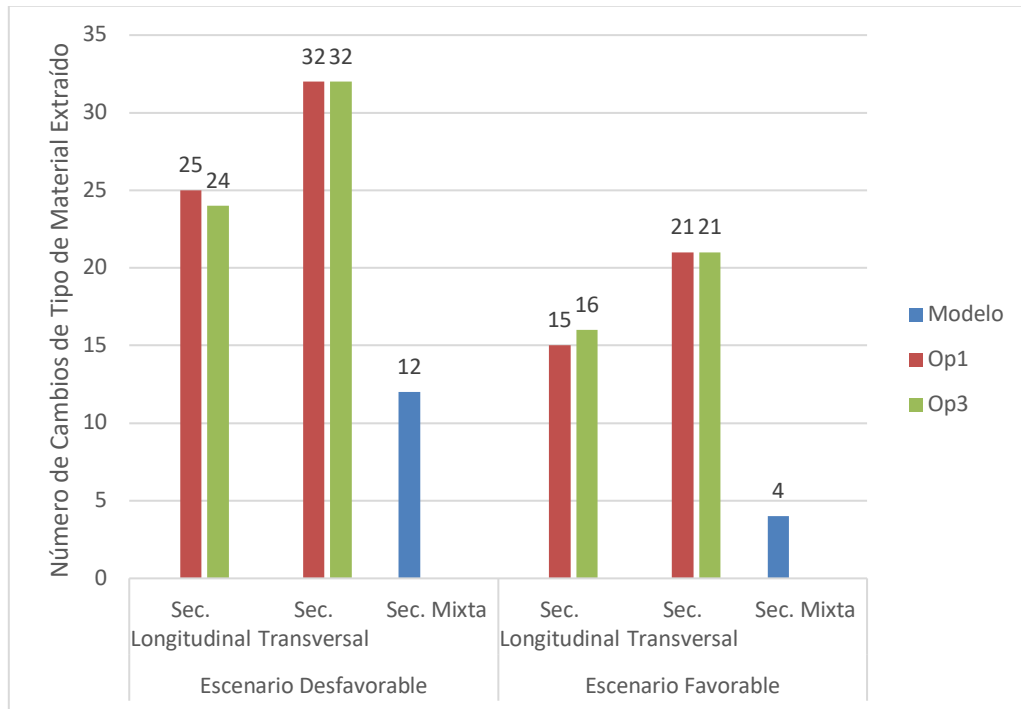
La Figura 36 muestra como varía la utilización según la secuencia de extracción, comparando la secuencias longitudinales y transversales con respecto a la secuencia

optimizada entregada por el modelo. Se observa que la utilización para la secuencia de explotación del modelo es ligeramente menor (entre 1 y 2%) que las secuencias transversales y longitudinales. Esto producto del mayor número de relocalizaciones que necesita el hacer el equipo teniendo en cuenta que el modelo no considera el traslado de los equipos en el agendamiento.



**Figura 37 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Rendimiento del sistema FMIPSC**

Para lo que respecta al rendimiento, los resultados se muestran en la Figura 37. Los gráficos muestran que el rendimiento nominal no se ve afectado de gran manera al seguir la secuencia del modelo. Se tiene que tomar en cuenta que la simulación de la secuencia del modelo considera que se aplica la secuencia más productiva encontrada (secuencia transversal) en las áreas de perforación y tronadura donde se tiene un solo tipo de material. Por tanto, en el escenario favorable, donde existe mayor número de áreas compuestas de un tipo de material, el rendimiento global del sistema se ve potenciado alcanzando un valor de 5,241[tph]. Por otra parte, en el escenario desfavorable el rendimiento de la secuencia del modelo alcanza un valor de 5,146[tph], siendo 40 a 80[tph] menor con respecto a la secuencia transversal y 100[tph] con respecto a su secuencia en un escenario favorable.



**Figura 38 Resultados de simulación de secuencia de explotación del modelo. Número de cambios de tipo de material extraído**

Los resultados de la secuencia del modelo reflejan una reducción representativa en el número de cambios en el tipo de material extraído (Figura 38), reduciendo de 50% a 62% en el escenario desfavorable y de 73% a 81% en el escenario favorable.

Con la finalidad de comparar la secuencia entregada por el modelo con respecto a una secuencia manual, que se proyecta sería la entregada por el modelo al considerar el traslado de los equipos y todos los agrupamientos de bloques posibles, se toma una sección del banco conformada por las áreas de perforación y tronadura 3 y 4 del escenario favorable cuando el material de interés para la extracción es estéril y se la compara con la secuencia entregada por el modelo para dicha sección del banco.





## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo se propone una metodología para evaluar la aplicación y el comportamiento de los sistemas FMIPSC con el fin de optimizar su rendimiento y aportar a la solución de la problemática de transporte en minería a cielo abierto. A continuación, se detallan las principales conclusiones del trabajo:

Los sistemas FMIPSC son una de las alternativas más interesantes a ser implementadas como sistema de manejo de materiales debido a su reducido costo operativo, alta productividad y menor requerimiento en combustible y mano de obra.

Los resultados de las evaluaciones de los métodos de carguío mediante simulaciones concluyen que:

- De los métodos de carguío evaluados, el método en conducción (drive-by) es el más productivo. Sin embargo, para su aplicación se requiere realizar desarrollos previos debido a requerimientos de espacio para la operación de los equipos.
- Los métodos de carguío más favorables para llevar a cabo zonas de desarrollo en bancos de 120[m] y 240[m] son los métodos con chancador fijo.
- Los métodos de carga en retroceso son la mejor opción para realizar desarrollos en bancos de mayores dimensiones.

A medida que se incrementa el tamaño del banco también incrementa la productividad promedio del sistema, acercándose a la productividad de los métodos de carguío en conducción. Esto ocurre debido a que una mayor proporción del banco es minado mediante este método.

La selección del tamaño de las áreas de perforación y tronadura es un factor importante que permite la continuidad de la explotación en el banco y garantiza la seguridad de los equipos durante la operación de tronadura.

La metodología utilizada permite optimizar la secuencia de explotación del banco, favoreciendo la extracción continua del material de interés, afectando levemente la utilización y rendimiento global del sistema.

Los modelos de simulación y optimización implementados permiten obtener resultados

con bajos tiempos de computo. En el caso del modelo de simulación entrega resultados en un promedio de 10[min], mientras que el modelo de optimización entrega secuencias explotación optimizadas en un tiempo promedio de 20[min] en áreas de 120[m]x120[m].

Finalmente, la metodología propuesta puede ser implementada para analizar el comportamiento de los sistemas FMIPSC y optimizar su rendimiento, combinando métodos de carguío altamente productivos en secuencias de extracción selectivas con orientaciones mixtas, combinando secuencias longitudinales y transversales, en diversos tamaños de banco y escenarios de distribución mineral.

## **6.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Las recomendaciones y el trabajo futuro son los siguientes:

- Mejorar clusterización de las actividades de forma que se obtengan todos los agrupamientos posibles en las zonas donde hay contacto entre bloques de diferentes tipos de material y de esta manera mejorar la selectividad del modelo.
- Crear actividades de penalización, entre las actividades agendadas por el modelo, que entreguen un valor asociado al tipo de material entre dos actividades. Esto permitiría penalizar el tiempo por cambio de tipo de material entre actividades o, a su vez, premiarlo favoreciendo la extracción de actividades contiguas y reduciendo el tiempo de traslado de los equipos en el banco. Estas actividades habilitarían la posibilidad de aplicar el modelo en el banco completo y no solamente por secciones o áreas de perforación y tronadura.
- Adaptar el modelo para generar secuencias de extracción óptimas y planes de producción a partir de una capacidad de planta dada.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Atchinson, T., & Morrison, D. (2011). In-pit crushing and conveying bench operations. *Coal International*, 259(5), 35–40.
- Banks, J. (1999). Discrete Event Simulation. Winter Simulation Conference, 7–13.
- CODELCO (2005). Norma ASARCO. Documento Interno, División Codelco Norte.
- Dean, M., Knights, P., Kizil, M. S., & Nehring, M. (2015). Selection and Planning of Fully Mobile IPCC Systems for Deep Open-Pit Metalliferous Applications. AusIMM 2015 3rd International Future Mining Conference, (December).
- Eivazy, H., & Askari-Nasab, H. (2012). A mixed integer linear programming model for short-term open pit mine production scheduling. *Mining Technology*, 121(2), 97–108.
- Espinoza, D., Goycoolea, M., & Moreno, E. (2012). MineLib : A Library of Open Pit Mining Problems. 1–27.
- Fioroni, M. M., Franzese, L. A. G., Bianchi, T. J., Ezawa, L., Pinto, L. R., & Miranda, G. D. (2008). Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In and O. R. S.J. Mason, R. Hill, L. Moench (Ed.), *Proceedings - Winter Simulation Conference* (Vol. 13, pp. 759–767).
- García, E., H. García y L. Cárdenas (2006). *Simulación y análisis de sistemas Promodel* (2nd ed.)
- Gholamnejad, J. (2008). A zero-one integer programming model for open pit mining sequences. (April), 759–762.
- Goycoolea, M., & Moreno, E. (2012). MineLib : A Library of Open Pit Mining Problems Daniel Espinoza, 1–27.
- Instituto Tecnológico GeoMinero De España. (1994). *Manual De Perforacion Y Voladura De Rocas*.
- Instituto Tecnológico GeoMinero De España. (n.d.). *Manual de Arranque, Carga y Transporte en Minería a Cielo Abierto*.
- Komatsu. (n.d.). Especificaciones Generales de la Pala Eléctrica de Minería P&H 4100XPC. Retrieved from <https://mining.komatsu>
- Law, A. M. (1991). *Simulation modeling and analysis*. McGrawHill New York LÓEcuyer P Giroux N Glynn PW (Vol. 2).
- L'Heureux, G., Gamache, M., & Soumis, F. (2013). Mixed integer programming model for short term planning in open-pit mines. *Mining Technology*, 122(2), 101–109.
- Londoño, J. G., Knights, P. F., & Kizil, M. S. (2013). Modelling of In-Pit Crusher Conveyor alternatives. *Mining Technology*, 122(4), 193–199.
- Mining Machinery Developments (MMD). (n.d.). Mmd sizers TM. Retrieved from <http://www.mmdsizers.com>
- Morriss, P. (2008). Key Production Drivers in in-Pit Crushing and Conveying (Ipcc) Studies. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (Surface Mining 2008), 33.
- Mousavi, A., Kozan, E., & Liu, S. Q. (2016). Open-pit block sequencing optimization: A mathematical model and solution technique. *Engineering Optimization*, 48(11), 1932–1950.
- Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eurek, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222–245.
- Oberrauner, A., Turnbull, D., & Systems, S. M. (2012). Essentials on In-Pit Crushing and Conveying (IPCC). 102, 13.
- Osanloo, M., & Paricheh, M. (2019). In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations : a literature review and research agenda. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 00(00), 1–28.
- Rocher, Winston, Nelson Morales y Enrique Rubio (2011). "Eight-Dimensional Planning: Construction of an Integrated Model for the Mine Planning Involving Constructability". En: APCOM 2011
- Rubio, E. (2006). Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning (T).
- Smith, M. L. (1998). Optimizing short-term production schedules in surface mining: Integrating mine modeling software

- with AMPL/CPLEX. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 12(4), 149–155.
- Terra Nova Technologies. (n.d.). In-Pit Crushing and Conveying \_ Terranova Technologies. Retrieved from <http://www.tntinc.com/equipment/inpit>
- Torkamani, E., & Nasab, H. A. (2015). A linkage of truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete-event simulation. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 6(2), 97.
- Upadhyay, S. P., & Askari-Nasab, H. (2017). Dynamic shovel allocation approach to short-term production planning in open-pit mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–20.
- Valdez, F., M. Lanata y W. Orosco (2011). Programación lineal en gestión de operaciones mineras. Preprint.

## ANEXOS

### Anexo 1. Modelo de optimización principal UDESS

A continuación, se presenta el problema de optimización base sin subactividades, sin precedencias del tipo o y sin forzar el término de las actividades agendadas.

#### Notaciones

$\Lambda$  Conjunto de actividades incluyendo las actividades padres de subactividades y excluyendo las subactividades.

$\Lambda_N$  Conjunto de las actividades de  $\Lambda$  que no son ni subactividad ni padre de subactividades.

$\Lambda_P$  Conjunto de las actividades de  $\Lambda$  que son padres de subactividades y que no son subactividades.

$\Lambda_R$  Conjunto de las actividades de  $\Lambda$  que son raíz y que no son subactividades.

$\Lambda_B$  Conjunto de las actividades de  $\Lambda$  que tienen solamente un grupo de precedencias y que no son subactividades.

$\Lambda_{JK}$  Conjunto de actividades definido por el usuario y propio a cada restricción, el usuario puede definir más de un conjunto por tipo de restricción. El index  $k$  permite distinguir los conjuntos elegidos por el usuario.

$P_i$  Conjunto de las actividades precedentes de la actividad  $i$ .

$\mathfrak{R}$  Conjunto de recursos

$T$  Horizonte de planificación

$L_t$  Duración del periodo  $t$

$D_t$  Descuento para el periodo  $t$ , con  $\alpha t$  tasa de descuento anual

$C_i$  Valor asociado al progreso de la actividad  $i$

$C_{i+}$  ,  $C_{i-}$  Costo por iniciar y costo por terminar la actividad  $i$ , respectivamente

$\bar{V}_i$  Velocidad máxima de la actividad  $i$  en cada período

$R_{i,r}+$  Cantidad de recursos, del tipo  $r$ , requeridos para iniciar la actividad  $i$

$R_{i,r}-$  Cantidad de recursos, del tipo  $r$ , requeridos para terminar la actividad  $i$  y  $r$

$R_{r,t}^{Jk}, \bar{R}_{r,t}^{Jk}$  Cantidad mínima (máxima) de recursos, del tipo  $r$ , disponible durante el período  $t$  para un grupo de actividades  $\Lambda Jk$

$S_{r,t}, \bar{S}_{r,t}$  Cantidad mínima (máxima) de recursos, del tipo  $r$ , disponible al comienzo del período  $t$

$\underline{R}_{r,t}, \bar{R}_{r,t}$  Cantidad mínima (máxima) de recursos, del tipo  $r$ , disponible al final del período  $t$

$\underline{P}_i, \bar{P}_i$  Cota mínima (máxima) sobre el progreso de una actividad  $i$  por periodo definidos por el usuario

$\underline{P}_i^\tau, \bar{P}_i^\tau$  Cota mínima (máxima) sobre el progreso de una actividad  $i$  sobre el intervalo de periodos  $\tau$  definidos por el usuario

$N_{J5}$  número máximo de actividades que pueden iniciar entre los períodos mínimos  $\underline{t}_{J5}$  y máximos  $\bar{t}_{J5}$

Las variables binarias se definen de la siguiente manera.

$$s_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{si la actividad } i \text{ ha comenzado en el período } t \text{ o antes} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$
$$e_{i,t} = \begin{cases} 1, & \text{si la actividad } i \text{ no está terminada al inicio del período } t \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Las variables continuas se definen de la siguiente manera.

$x_{i,t}$ : Porcentaje de progreso realizado por la actividad  $i$  en el período  $t$ .  
 $y_{i,t}$ : Tiempo consumido por la actividad  $i$  y sus predecesores en el período  $t$ .

El término  $\Delta s_{i,t}$  es definido a continuación

$$\Delta s_{i,t} = \begin{cases} s_{i,1} & , t = 1 \\ s_{i,t} - s_{i,t-1} & , t > 1 \end{cases}$$

Este término  $\Delta s_{i,t}$  vale 1 si y solo si la actividad  $i$  empezó en el periodo  $t$ .

(UDESS MAIN)

$$\max \sum_{t=1}^T D_t \left( \sum_{i \in \Lambda_N} (C_i \cdot x_{i,t} - C_i^+ \cdot \Delta s_{i,t} - C_i^- \cdot (e_{i,t} - e_{i,t+1})) \right) \quad (2.5)$$

s.a.

$$s_{i,t+1} \geq s_{i,t} \quad (\forall i \in \Lambda)(t = 1, \dots, T-1) \quad (2.6)$$

$$e_{i,t} \geq e_{i,t+1} \quad (\forall i \in \Lambda)(t = 1, \dots, T) \quad (2.7)$$

$$x_{i,t} \leq s_{i,t} \quad (\forall i \in \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.8)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} \leq 1 \quad (\forall i \in \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.9)$$

$$1 - e_{i,t+1} \leq \sum_{u \leq t} x_{i,u} \quad (\forall i \in \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.10)$$

$$P_i \leq x_{i,t} + 2 - s_{i,t} - e_{i,t} \quad (\forall i \in \Lambda_N)(P_i > 0)(t = 1, \dots, T) \quad (2.11)$$

$$P_i^\tau \leq \sum_{t=\underline{t}_i}^{\bar{t}_i} x_{i,t} \leq \bar{P}_i^\tau \quad (i \in \Lambda_N)(\tau = [\underline{t}_i, \bar{t}_i]) \quad (2.12)$$

$$R_r^{J_1} \leq \sum_{t=\underline{t}_r}^{\bar{t}_r} \sum_{i \in \Lambda_{J_1}} R_{i,r} \cdot x_{i,t} \leq \bar{R}_r^{J_1} \quad (\Lambda_{J_1} \subset \Lambda_N)(r \in \mathfrak{R}) \quad (2.13)$$

$$S_{r,t}^{J_2} \leq \sum_{i \in \Lambda_{J_3}} R_{i,r}^+ \cdot \Delta s_{i,t} \leq \bar{S}_{r,t}^{J_2} \quad (\Lambda_{J_2} \subset \Lambda)(r \in \mathfrak{R})(t = 1, \dots, T) \quad (2.14)$$

$$E_{r,t}^{J_3} \leq \sum_{i \in \Lambda_{J_3}} R_{i,r}^- \cdot (e_{i,t} - e_{i,t+1}) \leq \bar{E}_{r,t}^{J_3} \quad (\Lambda_{J_3} \subset \Lambda)(r \in \mathfrak{R})(t = 1, \dots, T) \quad (2.15)$$

$$s_{i,t} \leq 1 - e_{j,t+1} \quad (\forall i \in \Lambda_B)(\forall j \in P_i)(t = 1, \dots, T) \quad (2.16)$$

$$x_{i,t} = \bar{V}_i \cdot y_{i,t} \quad (\forall i \in \Lambda_R \cap \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.17)$$

$$y_{i,t} \geq y_{j,t} - L_t \cdot (1 - s_{i,t}) + x_{i,t} / \bar{V}_i \quad (\forall i \in \Lambda_R^c \cap \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.18)$$

$$N_{j_4} \geq \sum_{t=\underline{t}_{j_4}}^{\bar{t}_{j_4}} \sum_{i \in \Lambda_{j_4}} s_{i,t} \quad (\Lambda_{j_4} \subset \Lambda)(\forall i \in \Lambda_{j_4}) \quad (2.19)$$

$$s_{i,t} \leq 0 \quad (\Lambda_{j_5} \subset \Lambda)(\forall i \in \Lambda_{j_5})(t = 1, \dots, \underline{t}^{j_5}) \quad (2.20)$$

$$s_{i,t} \geq 1 \quad (\Lambda_{j_5} \subset \Lambda)(\forall i \in \Lambda_{j_5})(t = \bar{t}^{j_5}, \dots, T) \quad (2.21)$$

$$0 \leq x_{i,t} \leq \min(1, L_t \cdot \bar{V}_i) \quad (\forall i \in \Lambda_N)(t = 1, \dots, T) \quad (2.22)$$

$$0 \leq y_{i,t} \leq L_t \quad (\forall i \in \Lambda)(t = 1, \dots, T) \quad (2.23)$$

$$e_{i,1} \geq 1 \quad (\forall i \in \Lambda) \quad (2.24)$$

$$e_{i,t} \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in \Lambda)(t = 1, \dots, T+1) \quad (2.25)$$

$$s_{i,t} \in \{0, 1\} \quad (\forall i \in \Lambda)(t = 1, \dots, T) \quad (2.26)$$

El objetivo corresponde al VAN.



Las restricciones (2.6), (2.7) definen la progresión de las variables  $s$  y  $e$  en el tiempo, para una actividad  $i$ , mientras que las restricciones (2.8) establecen que una actividad no puede progresar si no ha sido declarada iniciada.

Las restricciones (2.9) establecen que la actividad puede desarrollarse hasta alcanzar un 100% de progreso durante el horizonte de tiempo. Una vez alcanzado dicho porcentaje esta debe ser declarada terminada, según las restricciones (2.10). De este modo nos aseguramos de que la actividad no se desarrolle más de una vez.

Las restricciones (2.11) y (2.22) delimitan el progreso mínimo y máximo de una actividad, respectivamente, en cada período. En las primeras, el progreso máximo estará dado por  $k_t \cdot \bar{V}_i$  siempre y cuando esta cantidad no sea mayor a 1. Las últimas sólo tendrán efecto en el problema cuando  $s_{i,t} + e_{i,t} = 2$ , esto es, cuando la actividad se esté desarrollando, con lo cual se tendrá que  $x_{i,t} \geq \underline{P}_i$ . Si se requiere acotar aún más el progreso de una actividad sobre una ventana de periodos  $\tau$ , se pueden imponer las restricciones (2.12).

Las restricciones (2.13) condicionan el desarrollo de todas las actividades según los requerimientos de recursos. Se restringe el consumo de este a lo largo de un rango de períodos  $[\underline{t}^{J1}, \bar{t}^{J1}]$  que puede ser de solo un periodo. Así, estas restricciones valen por las restricciones (operational resource constraint y range resource constraint de la interfaz gráfica) Las restricciones (2.12) a (2.15) las genera el usuario según sus requerimientos. Estas permiten generar limitantes adicionales sobre las variables.

Las restricciones (2.14) y (2.15) restringen el comienzo y el término de todas las actividades según si se necesita emplear una cantidad mínima de un recurso  $r$  y según la disponibilidad máxima en cada período, considerando que el consumo requerido para comenzar o terminar una actividad es  $R_{i,r}^+$ ,  $R_{i,r}^-$ , respectivamente.

La restricción (2.16) establece que aquella actividad  $i$  que posea un sólo grupo de precedencia deberán esperar a que cada una de sus actividades predecesoras  $j \in P_i$  estén terminadas para poder comenzar.

Mediante las restricciones (2.20) se impone que el comienzo de un conjunto de actividades  $\Lambda_{J5}$  se genere dentro de un rango  $[\underline{t}^{J5}, \bar{t}^{J5}]$ . También es posible limitar

la cantidad de actividades que comienzan dentro de un rango  $[\underline{t}^{J4}, \bar{t}^{J4}]$  incorporando la restricción (2.19) sobre un conjunto de actividades  $\Lambda_{J4}$ . Las primeras restricciones conforman la denominada restricción de períodos de comienzo (starting period constraint), mientras que la última se le conoce como restricción de incompatibilidad (incompatibility constraint).

Las restricciones (2.17) establecen la relación por periodo entre la duración y el progreso de una actividad raíz. El porcentaje máximo que puede realizar una actividad raíz, a lo largo del período  $t$ , es  $L_t \cdot \bar{V}_i$ . De manera proporcional se deduce que el tiempo requerido para esto es  $x_{i,t} / \bar{V}_i$ .

Para aquellas actividades que no son raíces, las restricciones (2.18) imponen que el tiempo consumido por estas vendrá dado por:

$$y_{i,t} = \max_{j \in P_i} \{y_{j,t} + x_{i,t} / \bar{V}_i\}$$

La expresión anterior toma en cuenta el tiempo consumido por la actividad predecesora que consumió mayor tiempo durante el período  $t$ , entre las actividades del grupo  $P_i$ , previo a la realización de la actividad sucesora  $i$ . En la Figura 2.3 se presenta un ejemplo ilustrativo de esto. Por último, la restricción (2.23) limita la duración de cada actividad durante un período  $t$ .

Un último aspecto a mencionar, respecto a las variables de tiempo, es que éstas proporcionan una manera de evitar disyuntivas al momento de establecer precedencias. Si no se establecieran las restricciones correspondientes podría ocurrir que una actividad se desarrolle durante el mismo período en que alguno de sus predecesores. Esto generaría problemas al momento de interpretar el agendamiento obtenido, sobre todo si la duración de una actividad y alguno de sus predecesores es tal que la suma supere la duración del período.

Las restricciones (2.20) a (2.26) definen el rango de cada variable.

## Anexo 2. Distribución de tiempos de eventos del modelo de simulación

### Distribución de tiempos de eventos de falla y reparación

Equipo	Unidades	MTBF			MTTR		
		Min.	Max.	Moda	Min.	Max.	Moda
Pala	horas	20	26	22.4	1.6	2.2	1.8
Chancador	horas	19	25.1	20.7	0.6	1.5	0.8
Correa Horizontal	horas	20	26	21.7	0.4	1	0.5
Perforadora	horas	51	53.3	52.1	1.8	2.5	2.2

### Distribución de tiempos de eventos

Evento	Unidades	Min.	Max.	Moda
Cambio de turno	min/turno	9.8	10.2	10
Colación	min/turno	50	70	60
Inspección geológica	min/día	18	22	20
Combustible *	min/día	12.5	17.5	15
Inspección de equipo	min/turno	8	15	10
Re-Inducción	min/semana	25	35	30
Otras demoras	min/semana	10	20	15
Clima desfavorable	días/año	2	4	3
Relocalizaciones Prog.	min/semana	10	20	15
Perdidas Industriales	días/año	3	5	4
Mant. Diario	horas/día	0.8	1.2	1
Mant. Semanal	horas/semana	6.2	6.8	6.5
Mant. Anual (pala y perforadora)	horas/año	2.7	2.9	2.8
Mant. Anual Sizer	horas/año	5.5	5.7	5.6





