



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

SELECCIÓN Y ASIGNACIÓN DE EQUIPOS DE CARGUÍO PARA EL
CUMPLIMIENTO DE UN PLAN DE PRODUCCIÓN EN MINERÍA A CIELO ABIERTO
POR MEDIO DE UNA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS PARRA RETI
MANUEL REYES JARA

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGISTER EN MINERÍA
POR: HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME
FECHA: JULIO 2019
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

**SELECCIÓN Y ASIGNACIÓN DE EQUIPOS DE CARGUÍO PARA EL
CUMPLIMIENTO DE UN PLAN DE PRODUCCIÓN EN MINERÍA A
CIELO ABIERTO POR MEDIO DE UNA METODOLOGÍA DE
SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN**

La minería a cielo abierto es un proceso intensivo en recursos y equipos. La decisión de qué equipo utilizar, cuántos comprar y dónde deben operar tiene un fuerte impacto en el valor del negocio. En las operaciones actuales, esta decisión se toma manualmente considerando el desempeño teórico o los datos históricos de la operación, que no necesariamente se ajustan a las condiciones actuales o futuras de la mina. Debido a la complejidad de la operación minera, es probable que la asignación manual de equipos no logre la configuración ideal a medida que la mina evoluciona y se desarrolla, lo que puede resultar en configuraciones no óptimas.

El trabajo desarrollado busca orientar la asignación de equipos y la generación de planes de producción. Mediante la incorporación de un modelo de simulación, junto con una metodología de asignación de equipos, fue posible capturar la incertidumbre de los sistemas pala-camión y lograr una adecuada asignación de equipos de carguío, logrando minimizar los costos operativos como asegurar el cumplimiento de un plan de producción.

Se desarrollaron dos ejercicios diferentes: en el primero se dispuso de un catálogo de equipos de carguío y el modelo logró decidir cuál de ellos utilizar en cada iteración; en el segundo no hubo libertad de selección de equipos, por lo que el modelo debió trabajar con los mismos equipos en cada iteración. El objetivo de estos distintos ejercicios fue estudiar la aplicabilidad de la metodología planteada en distintos contextos de proyectos: el primer caso (equipos libres) consideró un proyecto "Greenfield", o realizado desde cero, mientras que el caso de los equipos fijos se situó en un proyecto "Brownfield", en el cual las decisiones están limitadas por la situación actual de la operación.

Entre los principales resultados obtenidos se encuentra que, para el ejercicio de equipos variados, se logra una mejora, respecto del caso sin aplicar la metodología, del 83 % al 99 % en la extracción total, lo que se logra mediante la inclusión de nuevos equipos que no estaban en el caso base. Para el ejercicio de equipos fijos, no es posible superar el 86 % de extracción del plan base. Sin embargo, se genera un nuevo plan de extracción (con menos material) en el que la asignación consigue incluso una extracción del 100 % del material planificado.

La implementación de la metodología planteada en este trabajo permite mejorar la exactitud con la cual se estiman las productividades de los equipos, pasando de una sobreestimación de la productividad de un 44 % en el caso base a un 0.3 %. Con esta mejora se pueden generar planes de producción cuya extracción posea mayor confiabilidad que las asignaciones manuales de equipos.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF MASTER IN MINING
BY: HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME
DATE: JULY 2019
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

**SELECTION AND ASSIGNMENT OF LOADING EQUIPMENT FOR THE
FULFILLMENT OF A PRODUCTION PLAN IN THE OPEN-PIT MINING
INDUSTRY BY USING A SIMULATION AND OPTIMIZATION
METHODOLOGY**

Opencast mining is a resource- and equipment-intensive process. The decision of what equipment to use, how much to buy and where to operate has a strong impact on the value of the business. In today's operations, this decision is made manually by considering the theoretical performance or historical data of the operation, which does not necessarily adjust to current or future mine conditions. Due to the complexity of the mining operation, manual assignment of equipment is likely to fail to achieve the ideal configuration as the mine evolves and develops, which may result in sub-optimal configurations.

The work developed seeks to guide the assignment of equipment and the generation of production plans. By incorporating a simulation model, along with an equipment assignment methodology, it was possible to capture the uncertainty of the blade systems and achieve an appropriate assignment of loading equipment, minimizing operating costs such as ensuring compliance with a production plan.

Two different exercises were developed: the first had a catalogue of loading equipment and the model managed to decide which of them to use in each iteration; in the second there was no freedom to select equipment, so the model had to work with the same equipment in each iteration. The aim of these different exercises was to study the applicability of the methodology proposed in different project contexts: the first case (free teams) considered or a "Greenfield" project, or made from scratch, while the case of fixed teams was placed in a "Brownfield" project, in which decisions are limited by the current situation of the operation.

Among the main results obtained is that, for the exercise of various teams, an improvement is achieved, with respect to the case without applying the methodology, from 83 % to 99 % in the total extraction, which is achieved by including new teams that were not in the base case. For the exercise of fixed teams, it is not possible to exceed 86 % extraction from the base plan. However, a new extraction plan is generated (with less material) in which the allocation even achieves an extraction of 100 percent of the planned material.

The implementation of the methodology proposed in this work makes it possible to improve the accuracy with which the productivities of the equipment are estimated, going from an overestimate of productivity of 44 % in the base case to 0.3 %. With this improvement, production plans can be generated, the extraction of which is more reliable than manual equipment assignments.

“... eso, quería hacer un disco, lo hice. Me quedó mal, pero el segundo me quedó bien.”
Mantoi

Para mi familia y amigos, todo.

Agradecimientos

A mi madre, la primera editora. Su ayuda y apoyo siempre llega en buenos momentos.

A mi padre, quien hace todo lo que está a su alcance para ayudar.

A mi hermano, su trabajo y dedicación por lo que ama es mi base a seguir.

A mis abuelos, a quienes trato de hacer sentir orgullosos siempre.

A mi profesor, Nelson, siempre confiando y apoyando mi trabajo.

A Consuelo, sin su ayuda este trabajo hubiera demorado aún mas.

A mis amigos, siempre acompañando en todos los momentos.

A Diablos, con quienes a cabezazos nos distraemos de la rutina diaria.

A Macedonia, la música siempre ha sido y será el principal motor de mis días.

A todos ustedes, Gracias.

Este trabajo fue financiado por el proyecto CONICYT/PIA AFB180004 del AMTC y al
Proyecto CORFO 14IDL2 30132

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo Principal	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
1.3. Estructura del trabajo	4
2. Antecedentes	5
2.1. Minería a Cielo Abierto	5
2.2. Horizontes de Planificación	6
2.3. Planificación tradicional en minería a cielo abierto	7
2.3.1. Generación de pits anidados y selección de fases	7
2.4. Diseño minero	8
2.4.1. Consideraciones geométricas	8
2.5. Operación de Carguío y Transporte	10
2.5.1. Carguío y Transporte	10
2.5.2. Equipos de Carguío	11
2.5.3. Selección de equipos de carguío	14
2.5.4. Selección de Tamaño	15
2.5.5. Tiempo de ciclo teórico	16
2.5.6. Factor de llenado	16
2.5.7. Eficiencia del operador	17
2.5.8. Disponibilidad Mecánica	17
2.6. Gráficos de Agotamiento de Mineral	17
2.7. Incertidumbre operacional	18
2.7.1. Simulación de eventos discretos	18
2.7.2. Generación de un modelo de simulación	20
2.7.3. DSIM Open Pit	21
2.8. Norma ASARCO	24
2.8.1. Definición de tiempos	24
2.9. Programación Lineal	25
2.10. Programación Lineal y Simulación aplicados en minería	26
3. Metodología	28
4. Análisis y Resultados	31

4.1. Selección y Asignación de Equipos	31
4.2. Simulación y Optimización	33
5. Conclusiones	37
6. Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open Pit Production	39
7. Loading Equipment Planning Considering Optimization and Simulation for the Fulfilment of a Production Plan in Open Pit Mining	49
Bibliografía	59
Anexo A. Simulación	61
A.1. Número de Camiones	61
A.2. Ponderación de Tonelajes	65
A.3. Selección de Réplicas	65
A.4. Plan de Producción	67

Índice de tablas

2.2. Comparación de equipos de carguío <i>Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.</i> . . .	14
4.1. Cantidad de equipos seleccionados para cada caso: el porcentaje indica la diferencia entre los costos obtenidos con los del caso D	32
4.2. Parámetros Comparativos para Ejercicio de Equipos Variables	34
4.3. Parámetros Comparativos para Ejercicio de Equipos Fijos	34
A.1. Perfil de velocidad para camión de 288 [ton]	61
A.2. Número de camiones requeridos para cada mes de acuerdo al cálculo manual	61
A.3. Parámetros de Equipos de Carguío	62
A.4. Tiempo de carguío del camión de 288 [ton] para los distintos equipos de carguío	62
A.5. Tonelajes de los bancos a extraer	63
A.6. Distancia entre Fases y Destinos para camión Cargado	64
A.7. Distancia entre Fases y Destinos para camión Vacío	64

Índice de ilustraciones

2.1. Componentes básicos de un banco. Vista de perfil. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta & Martin, 2013.</i>	9
2.2. Banco de trabajo con equipos operando, la pala se encuentra cargando un camión aculatado mientras un camión ya cargado se dirige a su destino. Vista de perfil. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta & Martin, 2013.</i>	10
2.3. Componentes de una pala hidráulica. <i>Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.</i>	12
2.4. Componentes de una pala eléctrica. <i>Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.</i>	13
2.5. Ciclo de selección de tamaños de equipos <i>Fuente: Bozorgebrahimi, Hall & Blackwell, 2003.</i>	15
2.6. Tipo de equipo en función del tamaño de balde. <i>Fuente: Darling, 2013.</i>	16
2.7. Gráfico Serrucho genérico.	18
2.8. Etapas para la construcción de un modelo de simulación. <i>Fuente: Banks, 1999.</i>	23
2.9. Distribución de tiempos. <i>Fuente: Norma ASARCO.</i>	25
3.1. Esquema de proceso iterativo entre optimización y simulación.	28
4.1. Plan de producción para el caso E	33
4.2. Gráfico de agotamiento Caso Base	35
4.3. Gráfico de agotamiento mejor iteración	36
A.1. Tonelaje promedio considerando distintos números de réplicas	66
A.2. Diferencia entre tonaleja promedio considerando distintos números de réplicas	66
A.3. Plan de producción del caso base (primera iteración), alcanza un cumplimiento del 83%	67
A.4. Plan de producción de la mejor iteración, alcanza un cumplimiento del 99%	67

Capítulo 1

Introducción

La planificación minera es el proceso en el cual, entre otras cosas, son definidos los volúmenes de material a ser extraídos en un momento indicado y llevados a un destino específico. La toma de decisiones sobre los movimientos de material es un proceso de alta complejidad con diversas etapas, las cuales están presentes desde la concepción de un proyecto de una mina a cielo abierto hasta la última etapa en los bancos de producción. Sin embargo, el momento en el cual la extracción de material es conceptualizada ocurre en etapas intermedias a las mencionadas. Newman y col., [2010](#).

El objetivo principal de la planificación minera es maximizar el beneficio de un proyecto minero mediante la definición de una secuencia de extracción sostenible en el tiempo. La secuencia a determinar dependerá de la etapa en la que se encuentre el proyecto: en el caso de una planificación estratégica, lo que se buscará es determinar las porciones (fases) de la mina que deben ser extraídas para maximizar el valor del negocio; ya en la operación, las decisiones van enfocadas en lograr dar el uso más eficiente a los equipos utilizados para la extracción. La gestión adecuada de estos activos tendrá un fuerte impacto en los costos, así como en el logro de los objetivos de extracción de materiales.

En la minería a cielo abierto, más material es movido por cargadores y camiones que por todos los otros sistemas de excavación combinados, según Humphrey y Wagner, [2011](#). Debido a las condiciones inherentes a las operaciones a rajo abierto se requiere una gran cantidad de equipos, los cuales son de proporciones gigantescas y debe estar presente durante toda la vida útil de la mina. Estas condiciones dan como resultado que el mayor porcentaje de los costos operativos en la minería a rajo abierto se asocia con el carguío y el transporte.

Las decisiones tomadas en torno al dimensionamiento, selección y asignación de los equipos se realizan en general de manera manual y determinista, teniendo en cuenta las productividades teóricas o históricas de los equipos. Su rendimiento se considera como una constante dentro de la operación y no suelen considerar la naturaleza estocástica y dinámica de los equipos, ni actualizarse en función de los cambios en el entorno de trabajo. Krause y Musingwini, [2007](#)

Los altos costos asociados y el gran protagonismo que posee como operación unitaria

dentro del negocio minero hacen que la operación de carga y transporte sea un punto de gran interés para la implementación de mejoras. El planificador debe tener a su disposición las herramientas adecuadas que le permitan predecir el comportamiento de la operación y ser capaz de anticiparse a posibles problemas. De esta manera, los equipos pueden ser utilizados de manera eficiente, optimizando el uso de los activos a medida que se cumplen los planes de producción.

En este trabajo se propone y se desarrolla una metodología para asignar los equipos de carga a los diferentes bancos, de forma que el plan a largo plazo se cumpla de la mejor manera posible. Sin embargo, la metodología también tiene como objetivo mejorar la solidez de los planes mineros mediante la incorporación de la incertidumbre operativa. Esto se realiza combinando dos técnicas que son comúnmente utilizadas de manera independiente en la planificación minera: un modelo de optimización lineal que asigna el equipo, y una simulación que evalúa la asignación y proporciona retroalimentación al modelo de optimización para generar una mejor asignación de carga y transporte.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Principal

Proveer una metodología que permita mejorar la robustez de los planes mineros al incorporar incertidumbre operacional a un modelo de optimización mediante simulación de la operación de carguío y transporte.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar y modelar interferencias operacionales que afecten el proceso productivo.
- Comparar el cambio de asignación de equipos y de secuencia de extracción de material al aplicar la metodología propuesta.
- Cuantificar el grado de desviaciones en el plan de producción debido a interferencias operacionales.
- Obtener parámetros operacionales que se adecúen mejor a la operación con respecto a los considerados en la metodología tradicional.

1.2. Alcances

El trabajo se realizará utilizando información proveniente de un proyecto real, cuyo nombre debe permanecer confidencial por solicitud de los proveedores. Se cuenta con un modelo de bloques el cual tiene ya determinados los destinos (botadero, stock o planta) y el periodo en los cuales se extrae cada bloque, tanto así como las fases a las cuales pertenecen, definidos por

un plan de largo plazo a escala anual en un horizonte de 20 años. El modelo de optimización base con el que se cuenta fue desarrollado en el trabajo para optar al título de Ingeniero Civil de Minas "Selección y Asignación Óptima de Equipos de Carguío para el Cumplimiento de un Plan de Producción en Minería a Cielo Abierto".

Las consideraciones a utilizar en la optimización, por tanto, son las siguientes:

- Los movimientos de material por periodo determinados por el plan de largo plazo, así como los destinos asociados a cada bloque, no serán modificados.
- Las fases tampoco serán modificadas. La secuencia de extracción de los bloques vendrá condicionada a nivel de años tal como viene considerada en el modelo de bloques, la solución entregada por el problema de optimización será a escala de meses.
- Se trabajará con los tonelajes totales sin separar en estéril y mineral, el mineral extraído será cuantificado en proporción del tonelaje total.
- Se considerará sólo la asignación de equipos de carguío, el match pala-camión será parte de los supuestos considerados.
- La información asociada a costos de operación e inversión de equipos tanto como las características de éstos serán obtenidas mediante catálogos y benchmarking.
- Se incorpora un factor de ajuste, el cual irá ponderando la productividad de los equipos de carguío. Esto con el fin de incorporar los resultados de la simulación.

En paralelo se trabajará con la simulación, en la cual se considerará lo siguiente:

- El modelo de simulación no considerará otros equipos además de equipos de carguío y camiones.
- El manejo de materiales y procesos posterior al chancado no forma parte del estudio, al igual que el ingreso de insumos y carga de combustible de los equipos.
- No se considerarán Chancadores en la simulación.
- Debido a que los planes generados se encuentran en escala de meses se realizarán simulaciones de "días equivalentes", en donde cada día será representativo de uno de los meses.

1.3. Estructura del trabajo

Ya presentado el tema, los objetivos y alcances de este trabajo, se hará una breve descripción de los aspectos principales abarcados en cada uno de los capítulos:

En el Capítulo 2 se presentarán los antecedentes mas relevantes de la planificación minera en torno a la minería a cielo abierto, presentando ideas sobre el diseño minero, selección de equipos y dimensionamiento de flota. También se abarcan conceptos sobre simulación y optimización, para luego entrar a revisar algunos de los trabajos mas relacionados en la literatura.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología utilizada.

En el Capítulo 6 se presenta el paper titulado *Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open Pit Production*, el cual fue presentado en *27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018* y describe en detalle el funcionamiento del modelo de optimización.

En el Capítulo 7 se presenta el paper titulado *Loading Equipment Planning Considering Optimization and Simulation for the Fulfilment of a Production Plan in Open Pit Mining* el cual fue presentado en *Journées de l'optimisation 2019* en Montreal, Canadá y fue aceptado en la conferencia *Geomin-Mineplanning 2019*. En este paper se describe el sistema optimización-simulación.

Por último, se encuentran los anexos del trabajo. Presentando tablas y gráficos que por diversos motivos no pudieron ser incluidos en los papers.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se presentarán ideas básicas en torno a la planificación minera, las cuales van desde los horizontes de planificación hasta las herramientas utilizadas por el planificador al momento de visualizar los planes de producción.

Por otro lado se abordarán algunos conceptos básicos asociados al diseño de sectores de producción y la secuencia de extracción dentro de una mina a cielo abierto, tanto como conceptos relacionados con la selección de equipos de carguío para la minería a cielo abierto.

Por ultimo, se presentarán algunos conceptos en torno a los problemas de programación lineal y al uso de simulación en la planificación minera.

2.1. Minería a Cielo Abierto

La minería es el proceso de extracción de material naturalmente concentrado con el fin de obtener algún beneficio de ello. Estos beneficios son acordes a los objetivos del dueño del negocio y a la restricciones físicas, geológicas y medioambientales que el yacimiento presente según Newman y col., [2010](#).

Cuando el material concentrado se encuentra cercano a la superficie y se extrae sin la construcción de túneles se puede hablar de Minería a Cielo Abierto. Este método permite la producción de recursos minerales a bajo costo que hacen posible la extracción de yacimientos que de otra forma no serían rentables.

El proceso minero se puede dividir en distintas etapas dentro de las cuales destacan:

1. **Prospección:** consiste en la inspección visual por parte del geólogo en busca de indicios que lo lleven a descubrir un nuevo depósito mineral.
2. **Exploración:** los geólogos determinan el valor del depósito mediante la perforación y el análisis de testigos.
3. **Desarrollo:** en donde se construyen y se crean los accesos preliminares al material

que será minado, para el caso subterráneo, o a la remoción del material estéril que se encuentra sobre el mineral, para el caso de minas a cielo abierto.

4. **Explotación:** se extrae el mineral y se lleva a que sea procesado o a stocks.
5. **Recuperación:** se busca restaurar en la medida de lo posible el área en la cual se desarrolló la labor minera.

Dentro de la etapa de desarrollo se generan los planes mineros, en los cuales se busca estimar las capacidades de producción y la infraestructura. Es en esta etapa en donde se puede implementar la Investigación de Operaciones, dado que se deben tomar decisiones que consisten en cómo extraer el material y qué hacer con el material extraído. Como se utilizan maquinarias y equipos para realizar la extracción la decisión también radica en qué máquinas usar, cuántas se deben utilizar y dónde deben estar estos equipos, plantean Newman y col., [2010](#).

Los planes mineros obtenidos representan volúmenes de material a mover en un cierto periodo de tiempo y con un destino determinado. Dada la importancia que poseen dentro del negocio minero, es fundamental que estos sean factibles tanto desde el punto de vista de infraestructura disponible, así como que aseguren el abastecimiento de mineral a la planta por medio de una estrategia operacional adecuada.

Los depósitos minerales minados varían considerablemente en tamaño, forma, orientación y profundidad bajo la superficie. El cuerpo mineralizado es minado desde arriba hacia abajo en una serie de capas horizontales de ancho uniforme denominadas bancos. La extracción de material comienza con el primer banco y, después de que se ha expuesto suficiente área de trabajo, se comienza la extracción de la siguiente capa. El proceso continúa hasta el banco del fondo y para acceder a los distintos bancos, de acuerdo a lo que dicen Hustrulid, Kuchta y Martin, [2013](#), un camino o rampa deben ser construidos .

La operación minera en cielo abierto da lugar a la utilización de sistemas mecanizados con equipos de producción masiva, siendo una actividad intensiva en capital según Hartman y Mutmanky, [2002](#). Cada maquinaria exige una geometría asociada a su propio tamaño, pero también al espacio que requiere para operar eficientemente. Este espacio requerido es tomado en cuenta cuando se dimensionan los llamados bancos de trabajo. La producción resultante de la operación minera, por tanto, será un resultante del yacimiento, de las condiciones de operación y de los equipos y maquinaria que se seleccionen.

2.2. Horizontes de Planificación

La planificación minera se puede distinguir según el nivel de detalle y el grado de información que abarcan en tres categorías distintas Johnson, [1968](#) :

1. **Planificación de largo plazo:** En esta etapa se define el límite económico del pit final, es decir, define el tamaño y profundidad del rajo para el final de su vida . El plan de largo plazo se ajusta a la visión estratégica de la compañía y se analiza año a año
2. **Planificación de mediano plazo:** Se encarga de definir la secuencia y el agendamiento

de extracción de material guiando las condiciones iniciales del depósito hacia el pit final del rajo. Acá se busca definir la extracción en periodos que van desde meses a años.

3. **Planificación de corto plazo:** Se preocupa de la operación presente, funciona como la guía para los operadores que los conduce a alcanzar los objetivos de producción del mediano plazo. Está sujeto a las condiciones y restricciones bajo las que se encuentre la operación. El periodo de planificación es usualmente un año con etapas de meses, semanas o días.

2.3. Planificación tradicional en minería a cielo abierto

2.3.1. Generación de pits anidados y selección de fases

En la metodología tradicional, la planificación se realiza considerando como unidad básica un bloque, los cuales conforman un modelo de bloques de todo el yacimiento. Los bloques son descritos de acuerdo a su ubicación espacial y poseen una lista de atributos entre los cuales se encuentran densidad, ley de los elementos de interés así como de los elementos contaminantes, unidades geológicas y geomecánicas, entre otros. Estas últimas propiedades pueden ser únicas para todo el modelo o bien estar definidas en función de su ubicación espacial.

La manera de estimar y obtener los costos asociados a la extracción y procesamiento del bloque, junto con los beneficios asociados a la venta y comercialización de los elementos de interés se puede definir de acuerdo a la ecuación (2.1).

$$V_{bloque} = T_{bloque} [L_{bloque} \cdot Rec \cdot (P \cdot RF - C_{RyV}) - (C_{mina} + C_{planta})] \quad (2.1)$$

Donde:

V_{bloque}	=	Beneficio económico obtenido al extraer, procesar y comercializar el bloque.
T_{bloque}	=	Masa del bloque.
C_{mina}	=	Costo de extracción del bloque (Arranque, carguío y transporte).
C_{planta}	=	Costo de procesamiento del bloque
L_{bloque}	=	Contenido del elemento de interés del bloque (ley).
Rec	=	Recuperación metalúrgica del elemento de interés.
P	=	Precio de venta del elemento de interés.
RF	=	Factor multiplicador del precio.
C_{RyV}	=	Costo de refinación y venta del elemento de interés.

El valor final del bloque se fija como el mayor valor entre todas las alternativas de destinos disponibles (botadero, procesamiento, stocks).

Para determinar el pit final óptimo se utiliza el algoritmo de Lerchs y Grossmann, (1965), para lo cual se requiere el valor de cada bloque y las precedencias. Estas últimas se determinan en función del ángulo de talud impuesto por las condiciones geomecánicas.

La idea de incluir el parámetro RF en la ecuación (2.1) es permitir la creación de una serie de pits anidados al ir cambiando su valor. De esta manera, a medida que el RF va aumentando también crece el pit obtenido, comenzando con los bloques que poseen un mayor valor por lo que su pronta extracción favorece el negocio minero. De esta manera, se tiene una posible secuencia de extracción.

Continuando con el proceso de planificación, es necesario segregar las reservas que se encuentran en el pit en unidades más manejable. Estas unidades son las que se conocen como *fases*. Las fases son concebidas como un conjunto de pits anidados que cumplen restricciones operacionales y económicas. Las fases deben ser acordes con los equipos a utilizar en la extracción del mineral y la secuencia en la que se extraen depende de las restricciones espaciales asociadas al desfase entre bancos de fases continuas y al límite de bancos a extraer por año.

2.4. Diseño minero

Una vez que se tengan las fases seleccionadas, el siguiente paso es definir el diseño final de la mina el cual debe incluir los caminos y rampas que se utilizarán a lo largo de la operación futura. Los pasos para desarrollar la planificación y posterior diseño de las fases son los siguientes de acuerdo a Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013:

1. Decisiones y consideraciones preliminares:
 - La tasa máxima de extracción de mineral y estéril requerida para cada fase.
 - Las dimensiones de los equipos a utilizar, dado que determinarán los espacios mínimos de operación necesarios.
 - Definición apropiada de los ángulos de operación, inter-rampa y del pit final.
2. Usando las restricciones del paso anterior, se procede a diseñar las fases incluyendo las rampas. Se debe asegurar que los distintos bancos tengan acceso sin generar interferencias.
3. La siguiente etapa corresponde a la cubicación de los bancos, de manera de obtener los tonelajes y la leyes involucradas con el fin de crear un inventario de reservas para cada fase.
4. Finalmente se crea el plan de producción anual considerando las restricciones de alimentación a la planta y los requerimientos de los productos.

2.4.1. Consideraciones geométricas

En esta sección se comentará acerca de las consideraciones que se requieren en torno a las dimensiones que deben poseer los sectores de acceso al mineral.

La forma de extraer los distintos depósitos minerales varía considerablemente en función del tamaño, forma, orientación y profundidad que posea el yacimiento. Para el caso de las minas de cielo abierto, el cuerpo es minado desde la parte superior a la inferior por medio

de una serie de capas horizontales de grosor uniforme llamadas bancos, según comentan Hustrulid, Kuchta y Martin, [2013](#).

Los bancos son la unidad básica de extracción. Las superficies entre bancos están separadas por una distancia conocida como Altura de Banco y la cara subvertical es la llamada cara del banco. Los componentes básicos de un banco son mostrados en la Fig. [2.1](#)

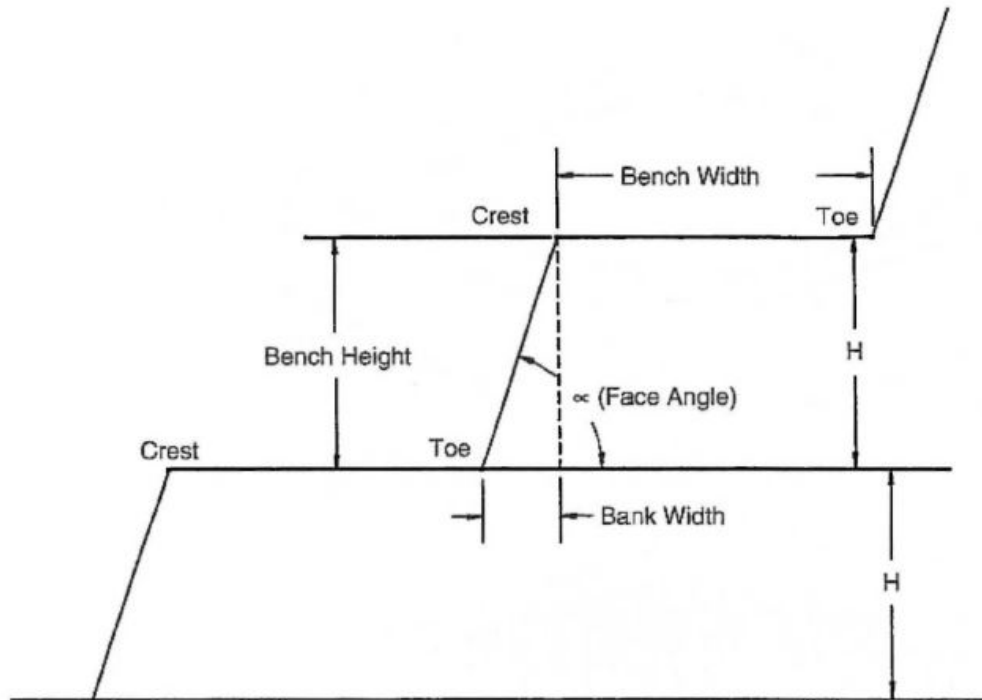


Figura 2.1: Componentes básicos de un banco. Vista de perfil. Fuente: Hustrulid, Kuchta & Martin, 2013.

La extracción comienza en el banco superior y sólo cuando se expuso suficiente área de piso se continúa con el siguiente banco. Este proceso se repite hasta que se alcanza el banco inferior. Para permitir el acceso entre bancos se construyen accesos y rampas. Los procesos de perforación, carguío y transporte deben contar con un espacio de trabajo, el cual es considerado para el dimensionamiento de los bancos de trabajo.

Los bancos se dimensionan de acuerdo a los equipos que se utilicen, para el caso de la utilización de palas para la extracción del mineral se deben seguir los siguientes pasos para el diseño de bancos:

1. Las características intrínsecas del yacimiento, como el tonelaje total, distribución de leyes, valor, entre otros, condicionan una geometría global y estrategia de producción.
2. La estrategia de producción se ve condicionada por las tasas de producción de mineral y estéril, requerimientos de mezcla y número de espacios de trabajo.
3. Los requerimientos de producción conducen a cierta flota de equipos de acuerdo al tipo de flota y al tamaño de ellos.
4. Cada equipo tiene asociado una geometría de operación óptima.

5. A partir del punto anterior se posee un rango de posibles geometrías de bancos.

Una representación de un banco con una pala se muestra en la Fig [2.2](#)

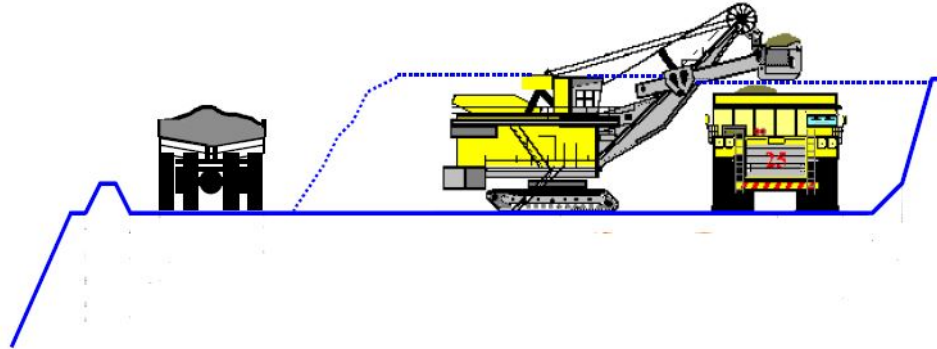


Figura 2.2: Banco de trabajo con equipos operando, la pala se encuentra cargando un camión acuatado mientras un camión ya cargado se dirige a su destino. Vista de perfil. *Fuente: Hustrulid, Kuchta & Martin, 2013.*

2.5. Operación de Carguío y Transporte

En esta sección se comentarán las características más relevantes entorno a los equipos de carguío utilizados en la minería a cielo abierto. En primer lugar se comentará sobre los procesos de carguío y transporte (cuándo, qué y con qué se hace) para luego pasar a comentar los tipos de palas que se utilizan en la gran minería y revisar detalles sobre su funcionamiento.

2.5.1. Carguío y Transporte

Desde una perspectiva simplificada, la minería se puede diferenciar en cinco distintas etapas: fractura de roca, excavación, carguío, transporte y procesamiento. Esto aplica para los minerales preciosos tanto como al carbón, arena y grava entre otros. Considerando esta básica división se puede ver que el carguío y transporte son parte vital de la cadena de producción del proceso minero, tanto desde el punto de vista de proceso como de costos: de acuerdo a Blackwell, [1999](#) la operación de los camiones por si solos puede llegar a significar desde un tercio a la mitad de los costos totales de la operación.

La operación de carguío comienza una vez que el material ha sido tronado y se haya revisado la zona para verificar que la operación se realice de manera segura (se buscan tiros quedados, colpas muy grandes, derrumbes, cuñas). Posterior a eso se recurre a los equipos de apoyo, tales como bulldozers, wheeldozer, cargadores de servicio, camiones de riego, para que dejen expedito el sector de operación. Una vez completado esto, los equipos de carguío con su correspondiente flota de equipos de transporte se posicionan en el lugar para iniciar operación.

El carguío, fundamentalmente, consiste en extraer el material tronado desde la frente de operación por el equipo de carguío para luego ser depositado en el equipo de transporte, para lo cual se requiere de un área de trabajo en donde ambos equipos puedan operar sin problemas. Posteriormente, el transporte consiste en trasladar el material a su punto de destino de acuerdo a sus características, el estéril a los botaderos, el mineral de baja ley a los acopios, acopios de lixiviación, acopios de mineral de alta ley, entre otros.

La operación se realiza con equipos adecuados dependiendo de las características de la operación (tipo de yacimiento, altura de banco, entre otros) y sus características se presentan en al siguiente sección.

2.5.2. Equipos de Carguío

La operación de carguío para el caso de las minas a cielo abierto, como se mencionó en secciones anteriores, requiere de grandes equipos debido a los grandes volúmenes de material que deben mover a diario con tal de obtener el mejor beneficio de la extracción de mineral. Estos volúmenes se ven enormemente afectados debido a la relación estéril/mineral propia de cada yacimiento.

De acuerdo a Humphrey y Wagner, [2011](#), más material es trasladado mediante equipos de carguío y camiones que por cualquier otro sistema de excavación. Entre las razones que se destacan se encuentra a que poseen una gran flexibilidad:

- No se encuentran restringidos dimensionalmente por el método de operación y son capaces de moverse en cualquier dirección por cualquier distancia.
- Pueden trabajar en diversas geologías y terrenos irregulares.
- Pueden ir agregándose a medida que son necesarios.

Su flexibilidad también los hace atractivos desde el punto de vista económico, dado que se pueden adaptar rápidamente a cambios de precios, de la geología o de otros aspectos que afecten y produzcan un cambio en el plan de producción.

Dado que los camiones funcionan en paralelo y, para sistemas suficientemente grandes, los equipos de carguío también, el impacto adverso que puede tener el mal funcionamiento de un equipo sobre el sistema total es minimizado.

Palas hidráulicas

Son equipos especialmente diseñados para las operaciones de excavación a cielo abierto. Pueden ser de motores diésel o eléctricos y su capacidad de carga por baldada va desde 27 a 81 [t]. Su vida útil es de aproximadamente 7 años con un costo promedio de 7 millones de dólares, de acuerdo a lo comentado por Bozorgebrahimi, Hall y Blackwell, [2003](#). Su movilidad se ve reducida debido a que se desplazan sobre orugas y alcanzan velocidades que van de 2 a 2.5 (km/h). Este tipo de palas puede llegar a consumir hasta 10.000 (l) de combustible al día, por lo que requiere ser abastecido a lo largo del día.

Dentro de los componentes más relevantes de las palas hidráulicas se encuentran los mostrados en la Fig. [2.3](#)

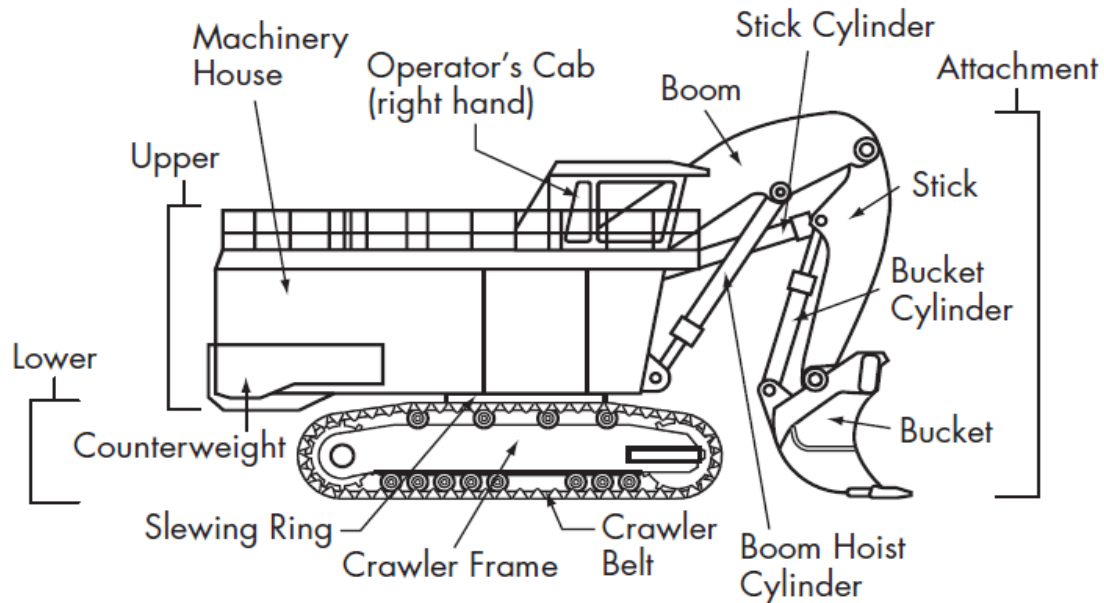


Figura 2.3: Componentes de una pala hidráulica. Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.

El ciclo de trabajo de una pala hidráulica cuenta con las siguientes fases según Castro, [2013](#):

- **Fase de excavación:** consiste en mover el balde por el banco llenándolo para luego levantarlo y liberar el banco.
- **Fase de giro:** una vez que el balde esté lleno, el brazo de la pala debe girar hasta llegar a la posición del camión. Esta etapa comprende acelerar suavemente, marcha de inercia y desaceleración.
- **Fase de retorno:** una vez descargado el material en el camión, el brazo gira de regreso al banco y se deja el balde en posición de excavación.
- **Fase de posicionamiento:** involucra mover el equipo más cerca de la frente de trabajo para mejorar la posición de excavación.

El tiempo de ciclo de una pala dependerá mayormente del arco de giro que recorre en la fase de giro dado que es el mayor del total de los tiempos de ciclo. A menor arco de giro la pala será más productiva y por tanto, a mayor arco será menor.

Palas eléctricas

También son conocidas como palas de cable, utilizan motores eléctricos, reductores de engranaje, tambores y cables, chasis superior y aditamiento. Su capacidad de carga va desde 54 a 110 [t] . Su vida útil en promedio es de 20 años o más y su precio rodea los 20-30

millones de dólares. Alcanza velocidades que van desde 1.3 a 1.7 (km/h). Las palas eléctricas requieren de un cable de alimentación, el cual debe resistir las condiciones extremas con las que se trabaja en minería.

Los componentes principales de una pala eléctrica se pueden ver en la Fig. 2.4

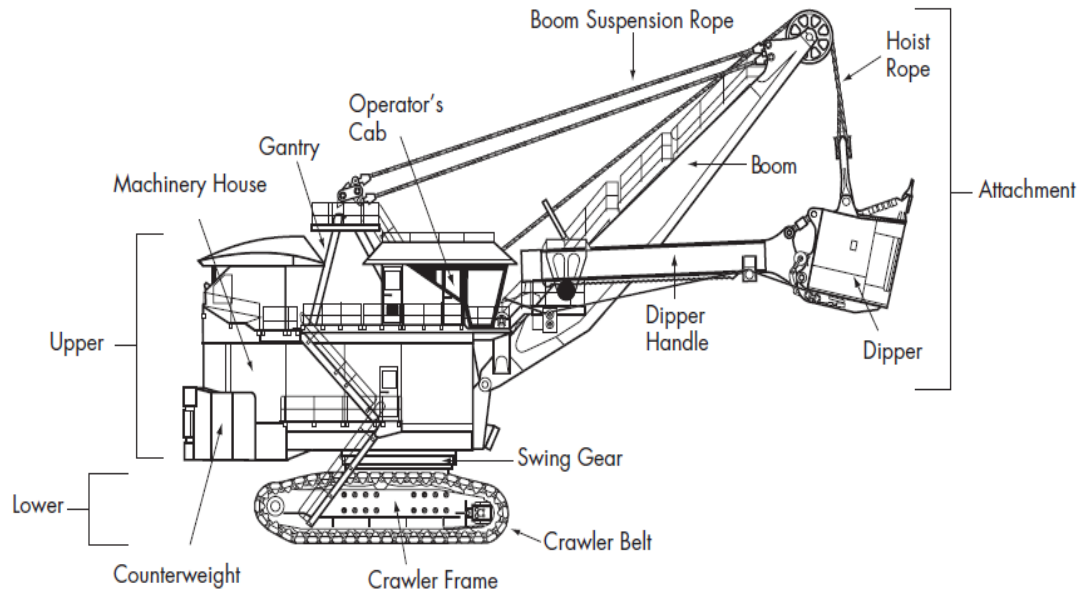


Figura 2.4: Componentes de una pala eléctrica. Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.

El ciclo de trabajo de una pala eléctrica cuenta con las siguientes fases de acuerdo a lo presentado por Castro, 2013 :

- Bajar el balde.
- Mover el balde hacia delante usando el empuje.
- Subir el balde y extender el empuje.
- Subir el balde sacándolo del banco hasta llegar a la altura del carguío del camión.
- Girar la estructura superior hasta que el balde llegue a la ubicación del camión.

La Tabla 2.2 muestra una comparación entre los dos tipos de equipos mencionados en esta sección.

Tabla 2.2: Comparación de equipos de carguío *Fuente: Humphrey y Wagner, 2011.*

Palas Hidráulica	Palas Eléctricas
Moderado costo de capital	Alto costo de capital
Moderado costo operacional	Bajos costos de operación (dependen de los costos energéticos)
Movilidad entre frentes	Falta de movilidad (debe estar conectada)
Habilidad de cavar desde arriba hacia abajo	El balde debe volver a nivel del suelo para escavar
Emite mayor gases de invernadero	Al ser eléctrico es más amigable con el medio ambiente

2.5.3. Selección de equipos de carguío

La optimización de los equipos está fuertemente relacionada con la optimización del pit. Mejorando la selección de equipos se disminuyen los costos mina y aumenta la productividad, entre otras cosas, y por tanto pueden cambiar los límites del pit, comenta Bozorgebrahimi, Hall y Blackwell, 2003

En la selección de equipos el tipo, tamaño y número de unidades son las mayores consideraciones las cuales están fuertemente relacionadas. En la Fig 2.5 se puede apreciar la forma en que se relaciona el tamaño de los equipos y distintos parámetros de la mina. La primera y más importante consideración es la producción diaria requerida, la cual se determina generalmente tomando en cuenta las reservas, el precio del material de interés, la estrategia de producción de la corporación y el periodo de retorno de inversión esperado.

El tamaño de los equipos es determinado considerando que la producción diaria depende de la eficiencia de los operadores, utilización, disponibilidad de los equipos y el layout de la mina.

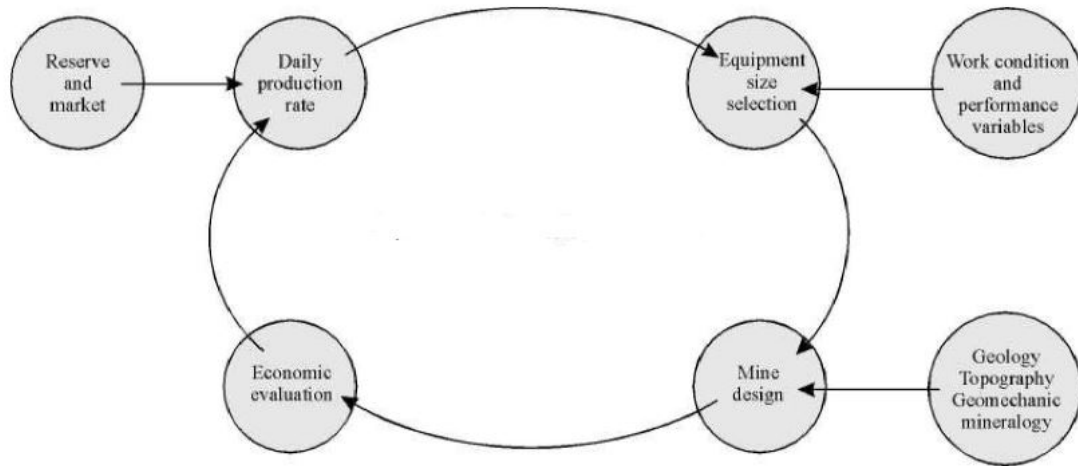


Figura 2.5: Ciclo de selección de tamaños de equipos *Fuente: Bozorgebrahimi, Hall & Blackwell, 2003.*

Independiente de la estrategia que se utilice para definir la flota, la meta del proceso de selección es satisfacer la producción requerida mientras se minimiza el costo mina.

El tipo de equipo de carguío que se utilice depende de los siguientes factores según Darling, 2013 :

- Selectividad requerida
- Altura de banco
- Compatibilidad con los equipos de transporte
- Productividad
- Flexibilidad
- Confiabilidad

Aparte de los criterios técnicos mencionados anteriormente no se debe dejar de mencionar los factores económicos involucrados. El costo de adquisición y mantención entre otros tienen un fuerte impacto en la decisión de compra y uso de equipos.

2.5.4. Selección de Tamaño

Lo primero para los equipos de carguío es determinar la tasa de producción y luego transformarla en volumen a mover por hora. Utilizando la ecuación (2.2).

$$Q = \frac{P \cdot T}{3,600 \cdot BF \cdot E \cdot A} \quad (2.2)$$

En donde:

- Q = Capacidad del balde.
- P = Producción requerida.
- T = Tiempo de ciclo teórico.
- BF = Factor de llenado del balde
- E = Eficiencia del operador.
- A = Disponibilidad mecánica del equipo .

A partir del tamaño del balde que resulte, se puede utilizar la Fig. 2.6 para determinar el tipo de equipo.

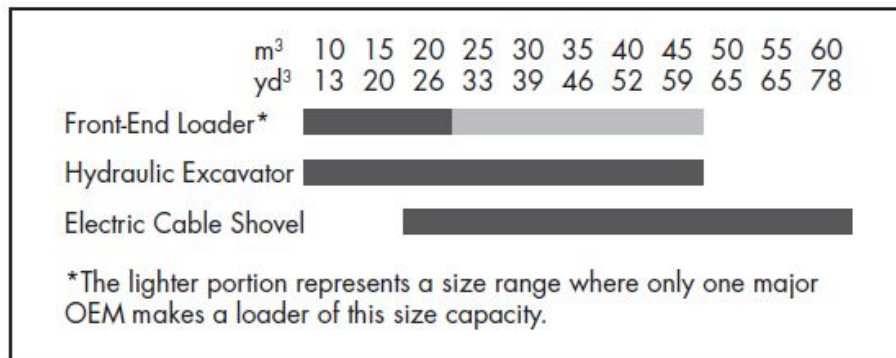


Figura 2.6: Tipo de equipo en función del tamaño de balde. Fuente: Darling, 2013.

2.5.5. Tiempo de ciclo teórico

El valor de T se obtiene directamente desde operación o por estudios de equipos similares en condiciones parecidas. En caso de que no se cuenten con datos, un ciclo de 30 a 40 segundos por baldada puede ser usado. El tiempo determinado dependerá el ángulo de giro que deba hacer el brazo del equipo desde el frente hasta el equipo de transporte.

2.5.6. Factor de llenado

Este factor depende del tipo de material e indica la dificultad con la que se puede llenar el balde.

2.5.7. Eficiencia del operador

Es el porcentaje del tiempo que el equipo se encuentra operando. Una buena administración de la operación, relacionadas con el liderazgo y la supervisión, pueden resultar en una mayor eficiencia de operación.

2.5.8. Disponibilidad Mecánica

La disponibilidad del equipo se encuentra en torno al 85 % y 95 % en los primeros años de operación del equipo.

2.6. Gráficos de Agotamiento de Mineral

A continuación se presentará una de las herramientas usadas por los planificadores para el control de la continuidad de la alimentación de mineral a la planta según el trabajo de Parra, [2006](#).

El gráfico de agotamiento de mineral, conocido también como *Serrucho*, es una representación de los movimientos de materiales del yacimiento periodo a periodo. La visualización de los movimientos permite asegurar la extracción continua de mineral desde un rajo.

En los Serruchos de Fases se puede observar cómo evolucionan las fases en el tiempo. La pendiente de las curvas permite visualizar la velocidad de extracción con la cual se está trabajando cada fase.

Los aspectos técnicos que definen las pendientes de estas curvas son los siguientes:

- Secuencia de explotación por material.
- Cubicación de todas las fases y expansiones de la mina.
- Ley de corte por periodos.
- Perfil de alimentación a la planta.
- Equipos de carguío disponibles.
- Ritmos de producción de los equipos de carguío.
- Cantidad máxima de equipos que pueden operar en determinadas condiciones de espacio.

La construcción del gráfico Serrucho se realiza mediante la suma de los tonelaje extraídos en cada periodo descontándolo al material expuesto del periodo anterior. Esto se realiza para cada fase separando entre estéril (valores negativos) y mineral (valores positivos).

Los gráficos Serruchos quedan graficados como la Fig. [2.7](#)

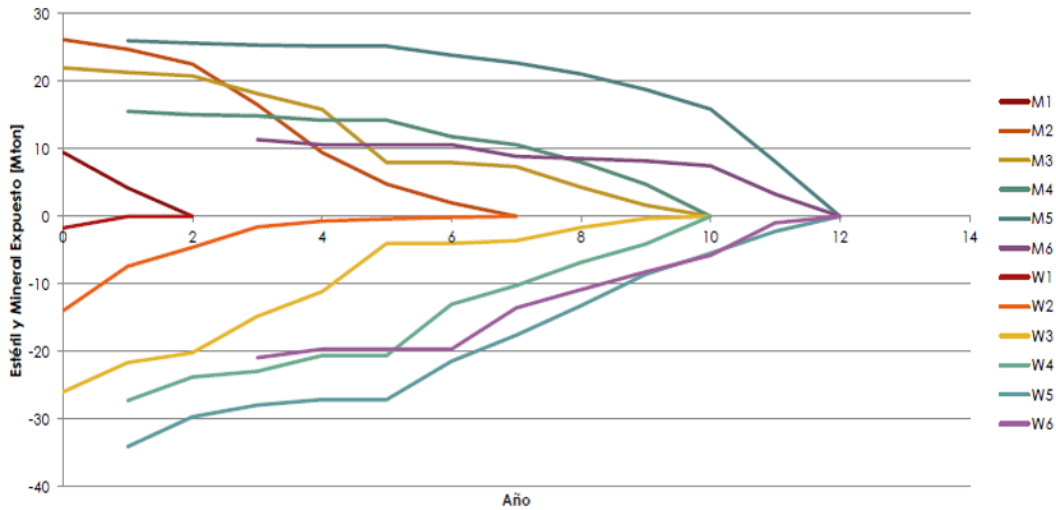


Figura 2.7: Gráfico Serrucho genérico.

A partir de la construcción de estos gráficos se puede obtener la siguiente información

- Fecha de llegada a mineral de cada fase.
- Meses de mineral expuesto.
- Ritmos de movimientos de cada fase por periodos.
- Requerimientos de equipos para cada fase y para el total de la mina en cada periodo.
- Movimientos anuales de material.

2.7. Incertidumbre operacional

A lo largo de esta revisión de antecedentes se ha hablado de la planificación desde un punto de vista determinista. Sin embargo, este enfoque no es el ideal. La operación minera es una actividad que está expuesta a distintos factores y elementos de naturaleza estocástica, los cuales deben ser incorporados en los estudios que se realicen con el fin de generar soluciones confiables y robustas.

La operación de carguío y transporte está sujeta a diversas fluctuaciones en su funcionamiento, desde fallos de los equipos involucrados hasta interferencias entre ellos. En las siguientes secciones se presentan las bases fundamentales de la simulación, técnica desarrollada para estudiar el funcionamiento de sistemas complejos y que se utiliza para incorporar y medir el impacto de elementos estocásticos.

2.7.1. Simulación de eventos discretos

La simulación es una técnica numérica implementada para realizar experimentos mediante un computador. Se describe el comportamiento y estructura de sistemas complejos a través

de relaciones lógico-matemáticas en intervalos, dado que lo se busca es lograr una imitación de un proceso real en el tiempo. Esto con el objetivo de analizar y observar una historia artificial que represente de manera adecuada un sistema real, y así poder sacar conclusiones relativas a la realidad, comenta Banks, [1984]

La simulación es una herramienta que puede aplicarse en el campo de la ingeniería de minas para la evaluación de desempeño de sistemas mineros complejos. Dentro de las evaluaciones importantes que se pueden realizar se encuentran: las interacciones internas entre equipos, utilización de equipos y la producción del sistema global. Dentro de los elementos clave que se deben tener en cuenta para el éxito de un modelo de simulación según García, García y Cárdenas, [2006] se encuentran cantidad de réplicas, duración de la réplica, variables de respuesta, relaciones entre variables, distribución de las variables aleatorias y el uso de la información.

Cabe destacar que la simulación presenta posibles ventajas y desventajas:

Ventajas

- Es una buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, lo cual puede ser riesgoso y/o costoso.
- Mejora el conocimiento del proceso actual, ya que le permite al analista ver cómo se comporta el sistema bajo distintos escenarios.
- Puede utilizarse como una herramienta complementaria para la toma de decisiones.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución cuando se quiere relacionar distintas variables y conocer su impacto en una variable final.
- En la actualidad, los software de simulación tienden a ser más sencillos en términos de que no se requiere un conocimiento extenso de programación.

Desventajas

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

Existen distintos tipos de simulación, pero la que se abarcará en esta revisión es la simulación de eventos discretos, la cual consiste en relacionar ciertos eventos por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas.

2.7.2. Generación de un modelo de simulación

La metodología utilizada para el modelo de simulación consta de 11 etapas principales. Dichas etapas son explicadas a continuación:

1. **Formulación del problema**

En ella se definen los elementos básicos de un proyecto, tales como sus objetivos y alcances. Se abarcan todos los aspectos claves del mismo y se acota según ciertos límites dados por el análisis que se quiere realizar.

2. **Establecimiento de objetivos y plan general del proyecto**

Los objetivos indican las preguntas que deben ser respondidas en el estudio de simulación. El plan del proyecto debe incluir una declaración de los distintos escenarios que se investigarán.

3. **Modelo conceptual**

El modelo conceptual sirve para generar la lógica de las tareas que la simulación debe cumplir. Su objetivo es servir de guía en la programación del modelo computacional.

4. **Recolección y análisis de datos**

Esta etapa puede desarrollarse en paralelo a la generación del modelo conceptual. La información puede ser obtenida de distintas fuentes, tales como:

- Opinión de Expertos.
- Bases de datos.
- Toma de datos empíricos.

5. **Codificación**

La codificación o modelo computacional toma la información obtenida a partir del análisis de datos con el fin de que sea lo más cercano a la realidad o a las condiciones operativas.

6. **Verificación del modelo**

En esta etapa se verifica el correcto funcionamiento del modelo. Se realiza estudiando el comportamiento de las variables y de los resultados finales.

7. **Validación del modelo**

Es el proceso que sirve para determinar el grado de semejanza entre el modelo de simulación y la realidad que se pretende representar. Se busca representar un fenómeno ya pasado o conocido con el fin de ver si el modelo es capaz de predecir el resultado correcto.

8. **Diseño de experimentos**

Tras validar el modelo se definirán los escenarios que serán analizados. En esta etapa se define el tiempo de simulación, número de réplicas y punto de inicio del problema.

9. **Corridas de producción y análisis**

Las corridas o réplicas y sus posteriores resultados son usados para medir el rendimiento de cada uno de los escenarios que desean estimarse. Estos resultados deben determinar si la cantidad de réplicas fueron suficientes o no.

10. **Documentación del programa y reporte de resultados**

Finalmente, se debe realizar el reporte de resultados junto con el análisis en base a los objetivos del proyecto. Posteriormente, si el modelo de simulación está validado, se puede implementar a distintos casos de estudio.

11. Implementación

Los resultados de la simulación deben ser considerados como un reporte, es decir, los resultados obtenidos deben ser considerados como información extra que servirá para tomar alguna decisión.

2.7.3. DSIM Open Pit

A continuación se describirá la herramienta de simulación a utilizar.

DSIM Open Pit (en adelante DSIM OP) es una herramienta de planificación que permite estimar la producción de un plan minero. Su base son los siguientes tres elementos: el layout de la mina (frentes de carga y descarga, rutas), la flota de equipos de carga y transporte y un plan minero, el cual indica cuánto se desea enviar desde cada frente a cada potencial destino. A partir de estos elementos, DSIM OP realiza simulaciones de eventos discretos del sistema de manejo de material, entregando reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo.

El 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 tiempos de operación, cuyos resultados han sido validados por la industria al realizar simulaciones de corto plazo, en Divisiones de CODELCO como Gabriela Mistral, Radomiro Tomic y Andina, además de operaciones como Escondida en el caso de BHP Billiton. Por otro lado, debido a que es un software programado por los desarrolladores del Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS, permite también el estudio de nuevas estrategias integradas al movimiento de material, como lo son condiciones ambientales (nieve), que pueden inhabilitar los caminos por donde se movilizan los camiones de extracción, o sistemas de manejo de material distinto como In-pit Sizing and Conveying (IPSC), In pit Crusher and Conveying (IPCC), High Angle Conveying (HAC), etc. Una de las principales ventajas de DSIM OP es que permite al usuario modelar de manera sencilla la operación de una mina a cielo abierto, comenta Pérez, [2017](#).

La herramienta considera lo siguiente:

- El plan minero ingresado posee los tonelajes a mover, el destino al cual deben ser enviados y el equipo de carguío que debe extraerlos.
- Los equipos de carguío son asignados a las frentes que indica el plan y comienzan el proceso de extracción.
- Los camiones disponibles son llamados hacia los equipos de carguío en operación, los cuales llevan el material hacia su destino final. La asignación de camiones puede ser selectiva, considerando compatibilidad entre los distintos equipos.
- Los camiones se mueven por las rutas previamente definidas, en las cuales se consideran posibles interferencias entre los equipos.
- Las interferencias pueden ser producidas por colas en ciertos puntos del layout (chancadores, puntos de carguío, entre otros) o debido a preferencias en cruces e intersecciones.
- Además de pérdidas de productividad asociadas a las interferencias, la herramienta

permite ingresar detenciones planificadas (como mantenencias de equipos o cambios de turno y colaciones) como también no planificadas (fallos de equipos).

- Los destinos a los cuales el material es enviado puede ser desde un simple punto de descarga (stock piles o botaderos) hasta considerar chancadores, incorporando una mayor complejidad al sistema al poseer sus propias capacidades máximas de alimentación.
- Los camiones consideran distintas velocidades de acuerdo a las características de las rutas y a si se encuentra cargado o no, así como también distintos perfiles de consumo de combustible.
- DSIM OP permite visualizar la simulación, en la cual se puede apreciar el movimiento de los equipos por el layout así como las productividades instantáneas de los equipos de carguío.
- El reporte de resultados incluye: material extraído desde las distintas frentes, utilizations y disponibilidades de los equipos. También entrega las productividades de los equipos y la distribución de tiempos (según norma ASARCO) en los cuales se encontraron.

Si bien es una herramienta bastante completa y de fácil manejo, la interfaz de la versión utilizada no considera lo siguiente:

- Stocks cambiantes a lo largo de la simulación. Los stocks pueden solo recibir material o enviar material, no pueden hacer ambas.
- Existen situaciones en las cuales las detenciones no funcionan del todo bien, acumulándose y considerando tiempos extras.
- No considera cambios en el layout de operación. Las distancias no cambian a pesar de haber extraído/depositado material desde los puntos de extracción o en los botaderos.
- Las rutas no permiten la opción de un solo sentido. Siempre son doble vía.
- El despacho de los camiones no considera la presencia de colas.

La herramienta DSIM Open Pit permite además la implementación de lectura de datos y despliegue de resultados de manera automatizada, pudiendo utilizarse para desarrollo de herramientas o metodologías mas complejas.

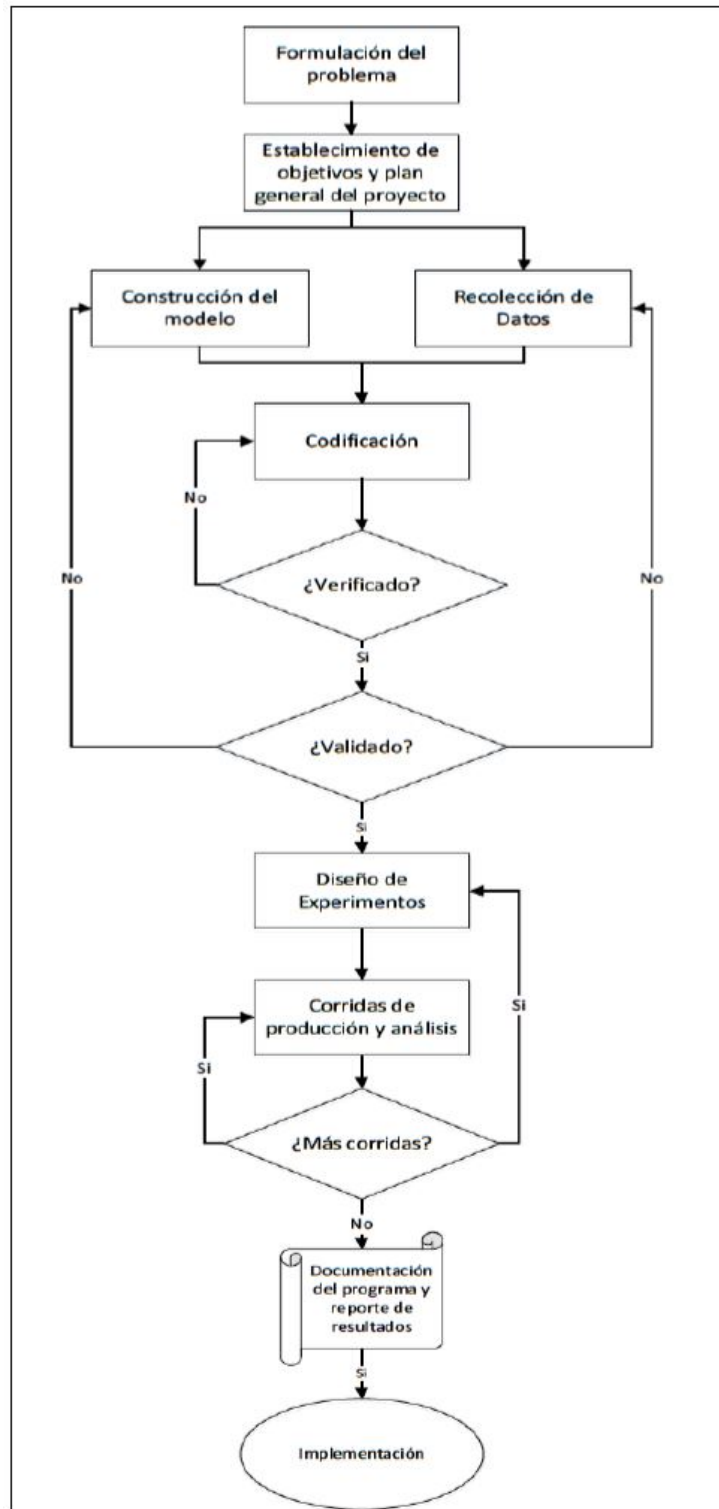


Figura 2.8: Etapas para la construcción de un modelo de simulación. *Fuente: Banks, 1999.*

2.8. 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 de acuerdo a lo definido por CODELCO, [2005](#).

Estos tiempos serán utilizados como referencia para medir y evaluar el desempeño de los equipos en las simulaciones.

2.8.1. 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 Operacionales	Demoras			
Efectivo		Prog.	No Prog.		

Figura 2.9: Distribución de tiempos. *Fuente: Norma ASARCO.*

2.9. Programación Lineal

La programación lineal es una técnica de modelamiento matemático diseñada para optimizar el empleo de recursos limitados. Se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables sujeta a una serie de restricciones, las cuales se expresan en forma de inecuaciones o ecuaciones lineales. El problema es considerado lineal dado a que tanto la función objetivo y las restricciones son lineales, es decir, cumplen con las propiedades de proporcionalidad y aditividad. Su utilización como herramienta de apoyo en la minería han ido creciendo a medida que los equipos computacionales han ido evolucionando. Valdez, Lanata y Orosco, [2011](#).

Los elementos básicos que un modelo de programación lineal debe incluir son los siguientes:

- **Variables:** lo que se busca determinar.
- **Objetivo:** lo que se busca optimizar.
- **Restricciones:** lo que se debe cumplir.

Un problema genérico puede representarse según la ecuación [\(2.3\)](#):

$$\begin{aligned}
 \max \quad & Z = c^T x \\
 \text{sa} \quad & Ax \leq b \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

En donde:

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

Este tipo de herramientas matemáticas ha sido utilizado en la industria minera desde la llegada de computadoras con mayores capacidades de cómputo debido a la gran magnitud de los problemas que se deben resolver en minería.

2.10. Programación Lineal y Simulación aplicados en minería

La generación de un plan de producción, así como las decisiones en relación a los recursos que se utilizarán para alcanzar ese plan, ha sido abordada generalmente de manera separada en la literatura. Sin embargo, en la realidad esas decisiones están conectadas.

La siguiente sección presenta una revisión sobre los aportes más relevantes en la literatura en los tópicos abordados en este trabajo, los cuales van desde la planificación de corto/mediano plazo hasta la simulación y optimización. La optimización y la gestión de operaciones ha sido incorporada de a poco dentro del proceso minero a lo largo de los años, obteniendo resultados y mejoras que han incentivado futuras investigaciones.

Weintraub y col., [1987] utilizaron la estructura de redes para el desarrollo de programación lineal basada en heurística. Buscaban determinar las rutas de distintos camiones con distintas capacidades minimizando el tiempo de espera de los cargadores para la extracción de mineral y estéril desde la mina. El autor utilizó los tiempos de carga, descarga y transporte de material así como la red de transporte como bases para obtener la solución del algoritmo. Este modelo resultó en un aumento de la producción de Chuquicamata de un 8 %.

Similarmente, Goodman y Sarin, [1988] desarrollaron un problema de programación entera que, combinado con un modelo de transporte, determinaba el secuenciamiento óptimo de equipos y la distribución de estéril. Ellos resolvían sucesivamente la porción entera del modelo, fijaban valores y evaluaban la solución en el modelo de transporte. De esta manera obtuvieron qué combinaciones de equipos de transporte resultaban en las mejores productividades.

Soumis, Ethier y Elbrond, [1989] también resolvieron un modelo por partes. En resumen, buscaban maximizar la productividad de camiones y palas mientras cumplían los requerimientos de demanda. Primero determinaban la localización de las palas para luego utilizar modelos de redes para establecer el plan óptimo de producción (considerando tiempos de espera). Finalmente resolvían un modelo de asignamiento en tiempo real para despachar los camiones en la mina.

Naoum y Haidar, [2000] desarrollaron un problema de programación entera para escoger los equipos que minimizaran los costos y que pudieran satisfacer los requerimientos máximos de producción, los límites de cantidad de equipos y las horas operacionales para cada equipo, además de la duración de la vida de la mina. Las distintas características de cada tipo de equipo, costos de inversión y de mantenimiento junto con las capacidades hacían difícil resolver el problema. Los autores utilizaron un algoritmo genético que entregara una solución que ahorrara el 15 % en costos de selección de equipos para distintos casos de estudios.

Najor y Hagan, [2006] usan la teoría de colas para modelar estocásticamente el comportamiento de sistemas de palas y camiones. Registran la productividad de los equipos dada la carga útil del camión, tasa de alimentación del chancador y tiempo de ciclo. El modelo analiza el tiempo que los equipos se encuentran inactivos y predice los momentos de menor alimentación a la planta. De ésta manera se obtuvieron resultados en la mina Pilbara en Australia que mostraban que ignorar las colas generaban una sobre estimación de la producción cercana a un 8 %.

Gurgur, Dagdelen y Artittong, [2011] plantearon un problema de optimización lineal que incluía la ubicación de los camiones y de los equipos de carguío para minimizar las desviaciones de la producción aportadas por la planificación estratégica. Sin embargo, no consideraba los costos de producción ni los movimientos de los equipos.

La simulación es comunmente usada dentro de la literatura para entender el comportamiento o resultado de un plan minero bajo la influencia de distintas fuentes de incertidumbre: dado un plan inicial, los metodos planteados pueden ser usados para entender los complejos sistemas mineros y proponer soluciones para adaptar o mejorar procesos.

Con respecto a la simulación en la operación Pala- Camión, Askari-Nasab y Torkamani, [2013] plantearon una metodología que permitía: determinar el número de camiones y palas requeridos para alcanzar una producción objetivo; evaluar la posibilidad de implementar manteciones programadas y la medición de KPI's. Dentro del trabajo de Askari- Nasab es relevante destacar que implementan la simulación de un agendamiento de corto plazo óptimo, que responde a los requerimientos globales de la mina en torno a objetivos económicos y operacionales. El mismo autor mas adelante plantearía una metodología enfocada en el estudio del rendimiento de un sistema minero. Askari-Nasab y Torkamani, [2015], frente a un plan de corto plazo dado, incorporan la incertidumbre asociada a los tiempos de ciclos de los camiones, las toneladas de material en cada camión, y la confiabilidad de los camiones y palas.

Hasta ahora la asignación de equipos de carguío no ha sido considerada como una prioridad. En general seleccionaban una ubicacion base y en torno a eso planificaban. Entre los trabajos que se enfocan en la asignación de equipos de carguío se encuentran el de Upadhayay y Askari-Nasab, [2016]. Propusieron un modelo que incluye tanto los objetivos de largo y corto plazo, así como los costos de movimientos y la locación de los equipos de carguío y los camiones. Sin embargo, realiza el asignamiento basado en una secuencia obtenida en una etapa previa mediante un algoritmo de agendamiento.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada para llegar a los resultados de los papers.

De manera general, lo que se busca es obtener un sistema iterativo entre el modelo de optimización y el de simulación. El modelo de optimización, en base los rendimientos estimados de los equipo de carguío, definirá un plan de producción el cual será luego simulado. La simulación entregará los rendimientos efectivos de los equipos, los cuales serán utilizados para la optimización de la siguiente iteración. El proceso se esquematiza en la Fig. [3.1](#).

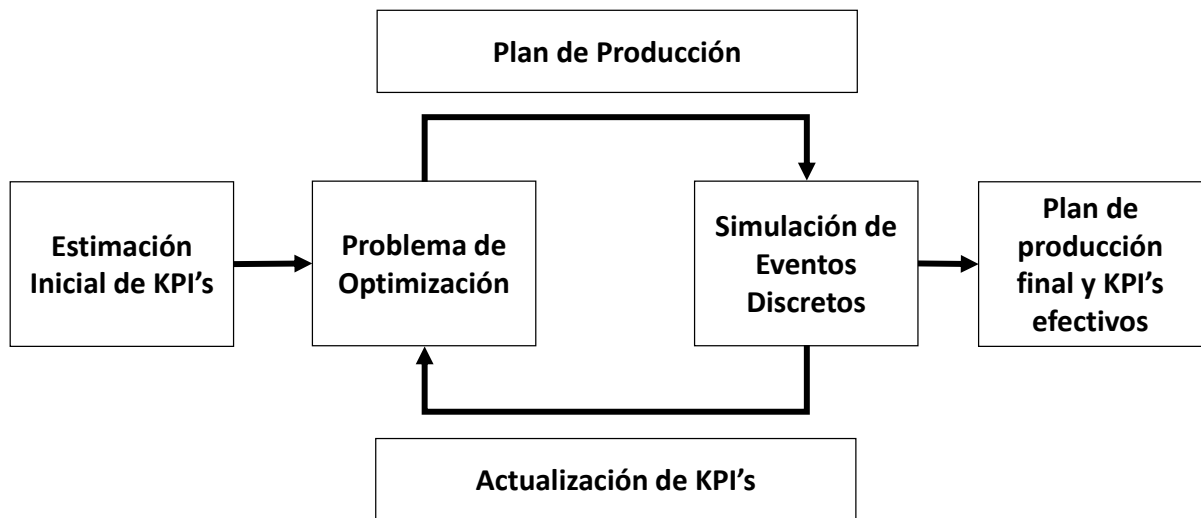


Figura 3.1: Esquema de proceso iterativo entre optimización y simulación.

A continuación se presenta el paso a paso para construir el modelo de optimización, el modelo de simulación y el sistema iterativo y de actualización de KPI's.

1. *Estudio de datos*

En primer lugar se realizará una revisión de los datos con el fin de crear el gráfico de

agotamiento de mineral a lo largo de la vida mina. Se cuenta con un modelo de bloques que contiene información de las leyes del material de interés, tipo de roca, tonelaje, periodo en el cual se extrae cada bloque, así como también la fase a la cual pertenece. A partir de esto se obtendrá el plan de producción a nivel de años.

2. *Recopilación de equipos*

Dado que se busca la asignación de equipos de carguío a su lugar de trabajo se deberá contar con un catálogo de equipos con las características de interés; costos y capacidades entre otros, por lo cual se realizará una búsqueda en catálogos de CAT la información asociada a equipos de carguío y de transporte. Estos datos servirán de inputs para el modelo que se construirá. A continuación, se escogerá un año de interés dentro del plan de producción de la mina, con el cual se trabajará en la construcción y validación del modelo creado. Con la selección del periodo se conocerá exactamente cuales son los bloques que se extraerán y las fases a las que pertenecen.

3. *Construcción del modelo*

Se trabajará en la construcción del modelo de optimización que determine la asignación de los equipos de carguío a las fases de producción a lo largo del tiempo tal que minimice los costos de producción. El modelo buscará incluir restricciones que reflejen la realidad de las condiciones con las que se trabaja en minería. El proceso de verificación del modelo consiste en la revisión de los resultados entregados por el modelo y el correcto funcionamiento de las restricciones impuestas en él.

4. *Desarrollo de solución de asignación manual*

Se construirá una solución de forma manual con el fin de medir las diferencias con los resultados provenientes del modelo construido. Se utilizarán las mismas restricciones que utilizará el modelo.

5. *Comparación de resultados*

Ya con todos los parámetros e inputs del modelo definidos y la asignación manual terminada, se procede a correr el modelo. El resultado obtenido será comparado con la asignación manual. Entre las variables que se analizarán se encuentran los costos de producción por año, la secuencia de extracción y el plan de producción resultante, considerando la alimentación a la planta.

6. *Layout de Simulación*

Se cuenta con el diseño de las rutas y caminos para toda la vida del proyecto, además de las topografías para cada banco de producción. A partir de esto se determinará la topografía representativa del año a simular y las rutas que seguirán los equipos de carguío. Se incorporarán cascos y talleres dentro del layout.

7. *Cálculo de flota*

Trabajando con el mismo año de producción seleccionado para el modelo de optimización, se procederá a calcular manualmente el número de camiones necesarios en la producción. Utilizando las distancias de los caminos a recorrer a los múltiples destinos y los tonelajes a mover se determinará el número de camiones necesarios para cada mes del año seleccionado. La flota seleccionada corresponderá al número máximo de camiones requeridos.

8. *Ajuste de Tonelajes*

Simular un año de producción no es algo factible desde el punto de vista de capacidad de cómputo. Por lo tanto, se trabajará con lo que será llamado *días equivalentes*. Cada mes de producción tendrá un día equivalente que será simulado, en el cual se moverá

una fracción del tonelaje mensual, buscando que sea representativo. De esta manera, en vez de simular un año de producción solo se simularán 12 días.

9. *Número de réplicas*

Para determinar el número de réplicas a considerar, se realizará en primera instancia una simulación base que considerará un gran número de réplicas. Con los resultados se determinará el promedio de tonelaje extraído primero con una réplica, para luego ir incrementando gradualmente el número de réplicas consideradas. El número seleccionado será cuando la variación entre un promedio y otro sea menor a un rango de tolerancia.

10. *Interacción entre modelos*

Para incorporar los resultados de la simulación dentro del modelo de optimización, se considerará la productividad de los equipos de carguío en cada una de las fases en las que trabajen. Esta productividad, que variará para cada equipo y para cada fase, será comparada con la productividad estimada y se construirá un factor de corrección. Este factor será incorporado en la estimación de la productividad de los equipos de la iteración siguiente. Todo el mecanismo de interacción será programado en Python.

11. *Definición de ejercicios*

Ya con el mecanismo de interacción y los modelos funcionando se procede a realizar los ejercicios. El primer ejercicio buscará determinar la flota de equipos de carguío óptima para el cumplimiento de un plan. El segundo ejercicio trabajará con una flota fija, y buscará crear el plan de producción que pueda ser extraído en su totalidad.

12. *Comparación de Resultados*

Una vez ejecutados los dos ejercicios se procederá a comparar los resultados con el caso base obtenido en la primera optimización. De esta manera se determinarán las consecuencias de incorporar la incertidumbre operacional en el proceso de planificación.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

En esta sección se presenta un resumen de los resultados presentes en los papers incluidos en este trabajo. En primer lugar se dan a conocer los resultados asociados al modelo de optimización y a los distintos ejercicios realizados con el fin de evaluar su comportamiento. Posterior a eso se muestran los resultados de la metodología de Optimización-Simulación.

4.1. Selección y Asignación de Equipos

Se definieron distintos escenarios para la evaluación del modelo de optimización. Los ejercicios consisten en la selección de los equipos a utilizar y en la asignación y secuenciamiento de la extracción:

- Caso A: asignación manual de equipos seleccionando aquellos de menor costo operacional.
- Caso B: asignación manual de equipos seleccionando aquellos de menor costo de compra.
- Caso C: asignación de equipos mediante el modelo de optimización, considerando los equipos seleccionados en el caso B.
- Caso D: asignación de equipos mediante el modelo de optimización, el modelo cuenta con libertad de selección de equipos.
- Caso E: asignación de equipos mediante el modelo de optimización, considerando una restricción de espacio de trabajo.

De acuerdo a lo presentado en la Tabla [4.1](#), se puede apreciar que el Caso D presenta el menor costo global. Esto se debe a que en este ejercicio el modelo no presenta restricciones asociadas a los equipos a utilizar ni a las restricciones de espacio. A pesar de que los escenarios B y C utilicen los mismos equipos de carguío el caso C se obtiene costos menores. Esto muestra el gran impacto que tiene la asignación de equipos y el secuenciamiento de la extracción en los costos y cómo una mejor estrategia de uso de recursos puede tener impactos positivos dentro de los costos.

Tabla 4.1: Cantidad de equipos seleccionados para cada caso: el porcentaje indica la diferencia entre los costos obtenidos con los del caso D

Casos	Equipos Seleccionados	$\Delta\%$ con Caso D
A	2 P01 - 2 P12	+162.2
B	2 P01 - 2 P04 - P05	+42.4
C	2 P01 - 2 P04 - P05	+14.3
D	2 P01 - 2 P02 - 2 P03	-
E	2 P01 - 2 P03 - P04	+0.6

Entre los casos C y D se puede notar que, dándole la libertad de escoger los equipos a ser utilizados, el modelo escoge equipos distintos a los seleccionados manualmente sin comprometer las metas productivas. La diferencia entre los casos A y B indica que, al realizar la evaluación en un periodo de 1 año, los costos operacionales son menos relevantes que los de compra. Esto quizás se revierta cuando se consideren varios años de operación, cuando los grandes tonelajes a ser extraídos resulten en que los costos operacionales adquieran un rol mas importante dentro de los costos totales.

La Fig. 4.1 muestra el plan de producción generado por la asignación de equipos del caso E. Se puede notar que el movimiento de material presenta un *ramp-up* durante los primeros periodos antes de estabilizarse, esto se debe a la restricción de área impuesto sobre el espacio de trabajo de los equipos: es necesario ir abriendo espacio de trabajo antes de que los equipos puedan operar totalmente.

Es posible apreciar que el estéril extraído presenta fluctuaciones mes a mes. Esto es porque el modelo concibe la producción como el resultado de un equipo de carguío asignado a un sector específico y no como un flujo constante de toneladas, a diferencia de herramientas convencionales de planificación. De esta manera, el modelo logra capturar y representar de mejor manera lo que ocurre en una operación minera permitiendo la creación de planes mas realistas.

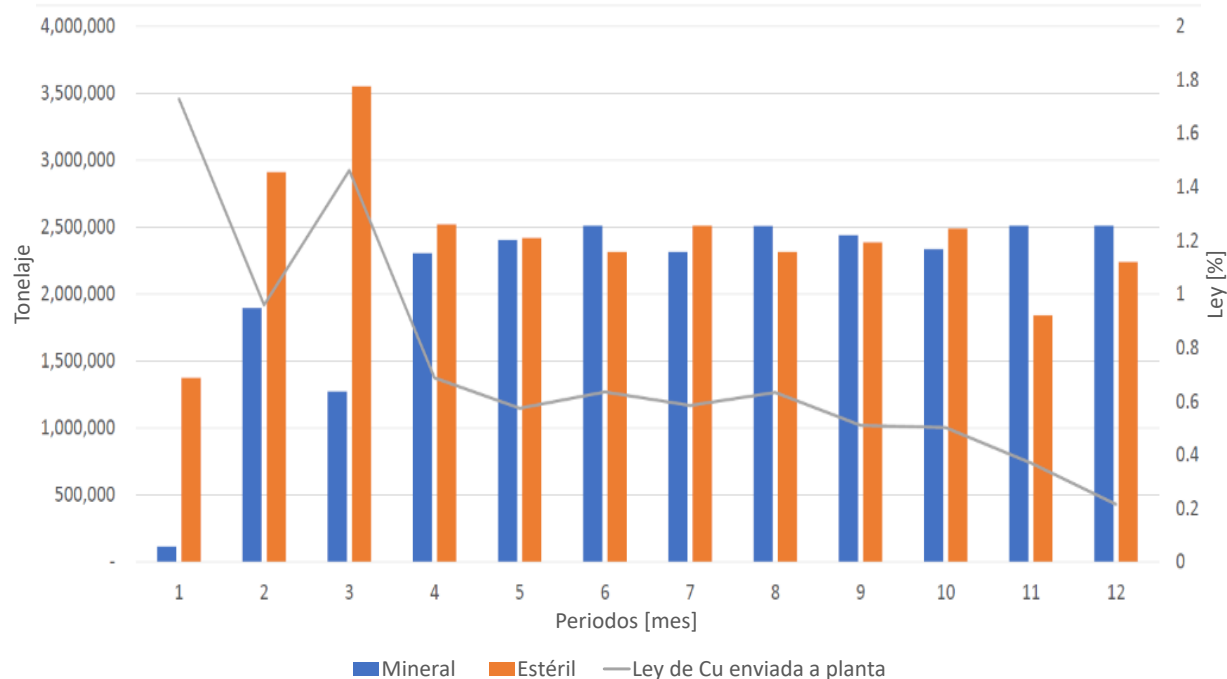


Figura 4.1: Plan de producción para el caso E

4.2. Simulación y Optimización

Los ejercicios llevados a cabo fueron dos: uno en el cual los equipos seleccionados pueden variar entre iteraciones y otro en el cual la flota de equipos se encuentra ya definida.

Para comparar los resultados del caso base (sin aplicar metodología de simulación-optimización) con los de la mejor iteración se revisará la diferencia entre los costos, el número de equipos, el cumplimiento del plan de extracción y la diferencia entre las productividad esperada y efectiva. También se incorpora el gráfico de agotamiento de material para el caso base y el de la mejor iteración.

La Tabla 4.2 muestra que en la mejor iteración permite estimar de mejor manera la productividad de los equipos, logrando extraer el tonelaje planificado casi en su totalidad. Esto se debe a que el caso base sobreestimaba la capacidad productiva de los equipos de carguío un 44%. Sin embargo, esta mejor estimación de la productividad resulta en la necesidad de disponer de un mayor número de equipos de carguío, incrementando el número de 5 a 9, lo cual trae un impacto considerable en los costos totales. Ahora bien, si se excluye el costo de los equipos nuevos y se compara solo los costos operacionales de ambos casos, la diferencia es del orden del 5%.

Tabla 4.2: Parámetros Comparativos para Ejercicio de Equipos Variables

Parámetros	Caso Base	Mejor Iteración
Costo Total [\$]	10,719,519	21,176,577
Costo Operacional [\$]	2,160,867	2,273,333
Número de Equipos [#]	5	9
Cumplimiento del plan [%]	83	99
Diferencia de TPH [%]	-44	-0.3

En la Tabla 4.3 se puede apreciar que el cumplimiento del plan en el caso base no supera el 83 %. Por otro lado, la metodología permite determinar un nuevo plan de producción que logra una extracción del 99 %.

Tabla 4.3: Parámetros Comparativos para Ejercicio de Equipos Fijos

Parámetros	Caso Base	Mejor Iteración
Costo Total [\$]	10,719,519	9,997,097
Tonelaje Planificado [ton]	1,799,835	1,219,547
Cumplimiento de Plan [%]	83	99

De estos dos resultados se desprende que los equipos seleccionados inicialmente no permitían la extracción total del material planificado por el modelo de optimización. Solo mediante la implementación de la metodología se logró: incorporar nuevos equipos para compensar la sobreestimación inicial de las productividades de los equipos (primer ejercicio) o disminuyendo el tonelaje a mover a justándolo a la productividad efectiva de los equipos iniciales.

Los gráficos de agotamiento de material que se presentan a continuación comparan la extracción de material planificada con la efectiva (simulada) para el caso base y para la mejor iteración. Estos gráficos corresponden al ejercicio de los equipos variados.

En la Fig. 4.2 se puede apreciar que en la fase 2 y 4 la curva de la simulación va por encima de la del modelo de optimización. Esto quiere decir que la tasa a la cual se está extrayendo el material es menor que la estimada en el plan. Esto implica que al final de los periodos aún va a haber material remanente en las fases, lo cual puede perjudicar la planificación de los siguientes periodos.

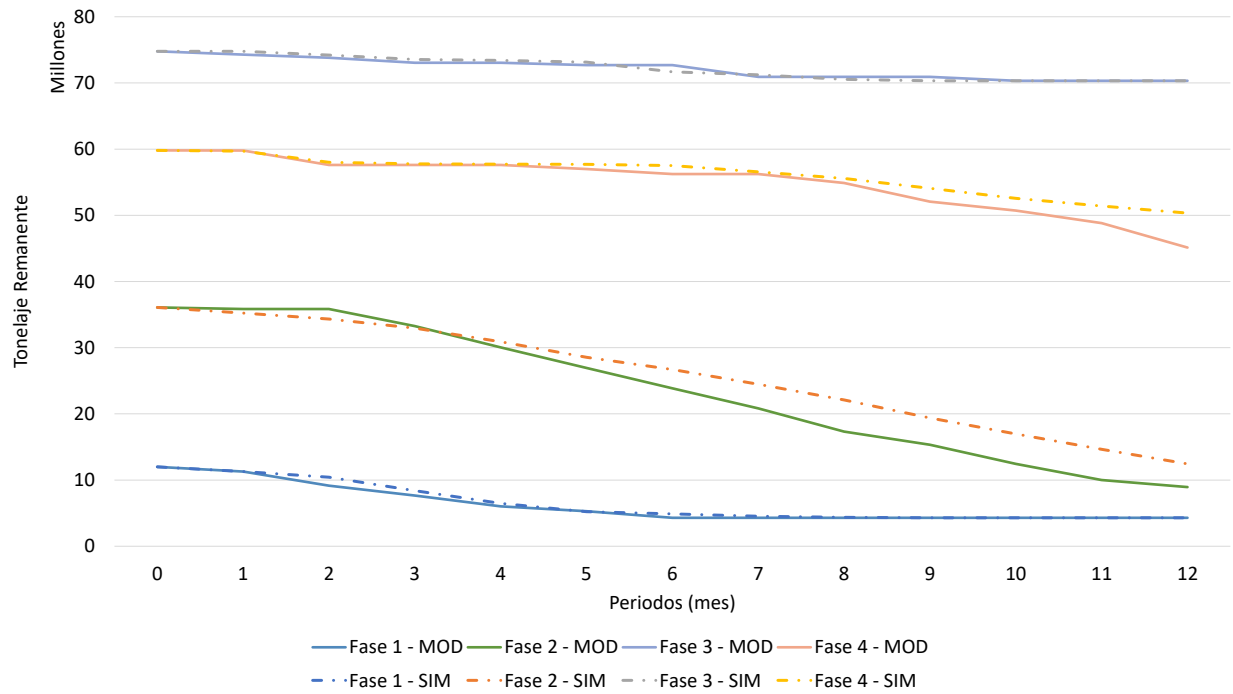


Figura 4.2: Gráfico de agotamiento Caso Base

Por otro lado, en la Fig. 4.3 la curva asociada a la simulación va por debajo de la del modelo de optimización. Esto implica que la tasa de extracción es mayor a la estimada en la planificación. En este caso casi el total del material planificado es extraído. Esto es consecuencia directa de la mejor estimación de la productividad de los equipos y, por tanto, un secuenciamiento de extracción de material mas adecuado.

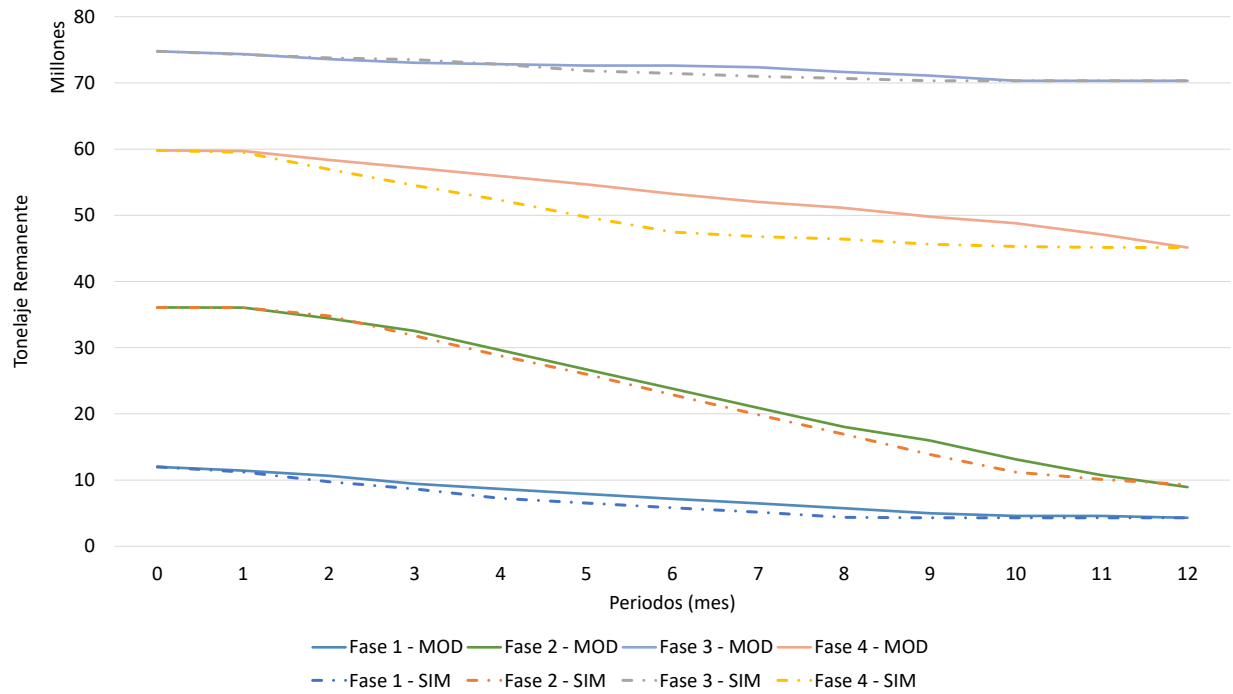


Figura 4.3: Gráfico de agotamiento mejor iteración

La implementación de la metodología permite pasar de una situación de retraso de envío de material a la planta (debido a la menor tasa de extracción) y de la presencia de material remanente no planificado al final de los periodos a una mejor en la cual todo el material es extraído y la planta es alimentada de acuerdo a lo planificado.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta sección se presentan un resumen de las conclusiones mostradas en los papers.

Como conclusiones generales, se destaca:

- La diferencia entre el tonelaje planificado y el tonelaje extraído corresponde a las pérdidas de productividad asociadas al propio sistema cargador-camión así como a las interferencias entre equipos.
- El enfoque determinista utilizado para el cálculo y asignación de flota no permite crear un plan de producción que anticipe e incorpore estas pérdidas y, por lo tanto, que su extracción sea factible.
- La simulación permite medir la interferencia que ocurre entre los equipos de carguío y transporte en la operación e incorporarla dentro de los planes de producción. De esta manera se logra generar un puente que comunique la planificación minera de corto y mediano/largo plazo, generando planes de producción cuya extracción sea mas confiable que la de la metodología tradicional. vulnerabilidades en la alimentaciñ a la planta.
- La metodología propuesta, así como el factor de ajuste de productividad, permiten la retroalimentación efectiva entre el modelo de optimización y la simulación, logrando que con el paso de las iteraciones se produzca una mejora en los planes de producción generados.
- La metodología desarrollada permite, dada una flota de equipos, obtener una asignación a los lugares de trabajo de los distintos equipos de carguío, encontrando una secuencia minera de corto/mediano plazo que cumple restricciones de operación y de producción. De esta manera se puede obtener una guía para el planificador, ahorrando tiempo y recursos.
- La consideración de capacidad de movimiento de material asociada a equipos individuales en vez de definir movimientos diarios permite obtener un plan que se ajusta mejor a lo que ocurre en las operaciones mineras. Logrando estimar costos y produccion de manera mas adecuada, así como determinar

Con respecto a los ejercicios realizados, la metodología permite:

- Los KPI's estimados de los equipos se encontraban sobreestimados, por lo cual no

era factible el cumplimiento de los planes propuestos. Al corregir la estimación entre iteraciones se logra alcanzar la producción esperada.

- Entre las iteraciones la asignación de equipos cambia, así como cambia la secuencia de extracción de los bancos. Esto puede traer consecuencias importantes para la operación minera, dado que cambios de secuencias pueden resultar en cambios de mineralogía y de tipos de roca, afectando a los procesos aguas abajo (chancado, flotación, filtros, entre otros).
- Para proyectos Greenfield, permite evaluar con antelación opciones de compra de equipos. Entregando una evaluación del desempeño de los equipos en la futura operación. De esta manera se puede saber si la flota dimensionada permite cumplir la extracción planificada o se deben hacer cambios en los equipos a utilizar.
- Para proyectos Brownfield, permite encontrar el plan de producción que maximice el cumplimiento de la extracción planificada. Al evaluar el desempeño de una flota determinada de equipos se determina si el plan actual es factible o no.

Sobre las estrategias y metodologías planteadas se puede concluir lo siguiente:

- La estimación de *di'as equivalentes* para la simulación permitió reducir de gran manera los tiempos de ejecución de los software involucrados, permitiendo así realizar distintos ejercicios en menos tiempo.
- Considerando el número de réplicas mínimo, con tal que la variación del tonelaje entre réplicas sea menor a la capacidad del camión, permitió ahorrar tiempo de cómputo entre simulaciones.
- Disminuir los tiempos de ejecución de la simulación es algo relevante para este tipo de metodologías dado que se basan en un gran número de simulaciones. De esta manera se avanza a desarrollar una estrategia que pueda ser implementada en la industria, en la cual el tiempo es un recurso valioso a considerar.
- Si bien el cálculo del factor de ajuste permite encontrar una solución que logra una mayor recuperación de material, no se considera su variación entre los distintos periodos de simulación.

Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open Pit Production Plan

Héctor González¹, Nelson Morales¹

¹ DELPHOS Mine Planning Laboratory, AMTC, DIMIN, Universidad de Chile, Chile

² AMTC, Universidad de Chile, Chile

Email of Corresponding author: hgonzalez@delphoslab.cl

Abstract. Open pit mining is a resource-intensive process, since the profitability of the business is strongly related to the magnitude of the tonnage extracted. Therefore, it is necessary to use large equipment to extract and transport material from the mine. The decision of what and how much equipment to buy and where it should be operating, strongly impacts the value of the mining business. Generally, the estimation of the material movements is made using various planning software based on a movement capacity of certain material in tonnes extracted per day, which not necessarily represents what happens in the operation.

In this paper, a multi-objective optimization model is presented, which aims to determine the optimal shovel-bench allocation for the operation and also show that the equipment allocation obtained can estimate a production plan that fits the reality better than the conventional methodologies. Several operational factors and restrictions are considered including mechanical availability, utilization, space restrictions and precedence among benches of different pushbacks. Divers experiments were carried and for all cases, fluctuations were obtained in the tonnages extracted per month that were not predicted in the mine plan with a production defined by a constant flow of tons. The presence of these fluctuations can indicate that a greater number of variables can still be considered within the planning that could allow building of more robust plans to guarantee a reliable operation in terms of production and feed to the plant.

Keywords: Mine Planning., Equipment, Assignment, Production Plan, Optimization.

1 Introduction

1.1 Motivation

Mine planning is a process in which, among other things, the volumes of material to be extracted at a given time and with a specific destination are defined. The decision on the material movements is a complex process with several stages which are present from the beginning of a project through selecting the blocks to be extracted in a block

model to the last stage of the bench. However, the moment in which material extraction is conceptualized occurs in intermediate stages to those mentioned.

Material transport is a highly important process in the mining business, mainly due to the high costs associated with it [1]. This is a consequence of: a large number of equipment involved in the operation, both for loading and transport; a high degree of mechanization and, above all, the presence of this process throughout the life of the mine.

Removing the rock from the mine is not the same as extracting blocks in a model. Consideration should be given to aspects related to the mechanical equipment that will be used to extract the material and equipment that will move it from the mine to its destination. The decision about which equipment to use, how many and what type to buy and where it should be operating has a strong impact on the value of the mining business. For these reasons, a model was created to determinate and evaluate various scenarios of material handling with different type and number of shovels.

The optimization of the equipment is strongly related to the optimization of the pit: improving the selection of equipment decreases mine costs and increases productivity, which influences the planning and design of pit limits [2]. It is possible to separate the planning process into levels, according to the characteristics of the decisions made [3]:

- *strategic*: refers to the selection of exploitation methods, mine capacity, processing and, in general, to the estimations of mining reserves. The main objective of strategic planning is to synchronize the market with the available resources and the mission of the company.
- *tactics*: corresponds to the specification of the processes to be carried out throughout the life of the mine, such as long-term production programs and programming models for the use of equipment and processing plants. Tactical or conceptual planning determines the way to achieve the objective previously established by strategic planning. Its result is the mine plan, which defines how the resources will be extracted.
- *operational*: involves the delivery of the material to its destination (for example using trucks) or the change of location of a shovel. The operational processes and indexes resulting from the mining plan are included in the operational planning.

The objective of this work is the creation of a methodology to support the development of an allocation plan for loading equipment in an optimal way that allows compliance with a production plan. In this way, a bridge between the level of tactical planning with the operational can be created. A base production plan from a real mine was used to compare the results obtained.

1.2 Related Work

Over the years, many techniques associated with operations research have been developed to assist in decision-making in mining. Temeng, Otuenye and Frendewey (1997) proposed an equipment dispatch system. Their work describes a model, which main limitation is the exclusion of the short-term production and the location of the

shovels. Gurgur, Dagdelen and Artittong (2011) propose a linear optimization problem that provides the location of trucks and shovels to minimize deviations from the progress of the mine provided by strategic planning. However, it only considers the long-term information, leaving aside costs of production and movement of the equipment.

S. P. Upadhyay & H. Askari-Nasab (2016) propose a model that includes both long-term and short-term objectives, as well as movement costs and allocation of loading equipment and trucks. However, it performs this assignment based on the sequencing obtained in a previous stage using a clustering and scheduling algorithm.

Linear optimization applied to the optimization of the mining operation reveals the following:

1. the allocation of the shovels has not received enough attention in the literature.
2. the models do not present communication between strategic planning and production in the operation.
3. the models depend on multiple stages to find a solution.
4. the sequencing of the extraction in many cases is an input for the assignment of shovels and trucks.

The model proposed in this paper seeks to incorporate the aforementioned points (single stage optimization, communication between strategic planning and production, the sequencing of the extraction as result of the shovel assignment) into the optimization problem to obtain a one-stage solution that is interpreted as planning at the operational scale and which leads to meeting long-term goals.

1.3 Problem Statement

Data from a real mine operation were used to validate the model. The name remain confidential at the request of the suppliers. The optimization problem was addressed using the Python programming language.

The data used included:

- the material movements per period determined by the long-term plan, as well as the destinations associated with each block, without modification
- the pushbacks (without modification) and the sequence of extraction of the blocks conditioned at the level of years as it is considered in the block model with the solution delivered by the optimization problem on a monthly scale.
- the extracted mineral was quantified in proportion to the *extracted tonnage* and the *mineral/total tonnage* ratio of each bench.
- equipment operational and investment costs as well as equipment characteristics (obtained from catalogs).

2 Methodology

A review of the data obtained from the mine site was performed to determine the mineral depletion throughout the mine life. Since the assignment of loading equipment to the particular workplace is sought, a catalog of equipment was used to obtain data regarding equipment characteristics, costs and capabilities, among others. The

construction of the optimization model that determines the allocation of the loading equipment to the production pushbacks over time to minimize production costs was made.

The equipment assignment was made manually as well as using the model to measure the differences. The results obtained using modelling were compared with the manual assignment and the base production plan.

3 Optimization Model

Within the dynamics in which the loading equipment operates in a mining operation, numerous factors that affect productivity were considered:

- mechanical Availability.
- operational factors.
- available operating space.
- precedencies between bench of the same and different pushbacks.
- feed requirements to the processing plant.
- production goals.
- cost of production and acquisition of equipment.
- productivity of the equipment.

3.1 Variables

The decision variables for the model made according to Equations 1 through 6:

$$x_{p b f t} = \text{percentage of period } t \text{ that shovel } p \text{ is in bench } b \text{ of phase } f \quad (1)$$

$$\bar{x}_{p b f t} = \begin{cases} 1, & \text{if the shovel } p \text{ is in bench } b \text{ of phase } f \text{ of period } t, \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{b f t} = \begin{cases} 1, & \text{if bench } b \text{ of phase } f \text{ is active in the period } t, \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{z}_{b f t} = \begin{cases} 1, & \text{if bench } b \text{ of phase } f \text{ was extracted in period } t \text{ or later,} \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{p t} = \begin{cases} 1, & \text{if the shovel } p \text{ is bought in period } t \text{ or earlier,} \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{w}_{p f t} = \begin{cases} 1, & \text{if the shovel } p \text{ is assigned to phase } f \text{ in period } t, \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (6)$$

Equation (1) is the decision variable that quantifies the production associated with each equipment in operation while the variables (2) to (6) are used to regulate the precedencies and assignments of the equipment to the operation.

3.2 Objective Function

The final objective function is given by equation (7):

$$\min: \sum_t K_p \cdot w_{pt} \cdot FD_t + \sum_{p,t,f,b} C_p \cdot x_{pbft} \cdot Q_p \cdot D_p \cdot Fill_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot FD_t \quad (7)$$

The objective function of the model (Equation 7) seeks to minimize the costs associated with the acquisition of loading equipment (K_p) and the operational cost based on the extracted tonnage (C_p). The tonnage extracted in each period is expressed by the multiplication of the capacity per hour of the equipment (Q_p) by the corresponding operational factors (D_p : mechanical availability, $Fill_p$: filling factor, FO_{bf} : utilization), the fraction of the period the equipment is operating (x_{pbft}) and the duration of the period (T_t). The values are discounted in time using the discount factor (FD_t) that corresponds to the duration of the period. In this way you can use the model with periods of days, weeks or months.

The variables are subject to different restrictions to ensure that the solution obtained represents the operation in the best possible way. In particular, the restrictions indicate that:

- variable (1) cannot exceed the duration of the assigned period;
- the movement of material associated with the variable (1) must meet the productive goal for the end of the total periods;
- the equipment can only be assigned if the variable (5) indicates that the equipment is available;
- to begin work on a new bench all the material of the predecessor benches must be extracted, which is indicated by the variable (4);
- the precedencies are given by the sequence of benches of the same phase and different pushbacks according to operational criteria;
- to assign working time to a bench, the bench must be marked as active according to the variable (3) and with an equipment assigned according to the variable (2);
- in order to assign an equipment to a bench, space must be available for its entry, which is entered as an input for each bench and is updated period by period according to the material extracted in that sector;
- the total extracted mineral must comply with the requirements of the plant;
- there is a limit of assignment of the same equipment to different pushbacks of work in each period.

4 Model Inputs

The model seeks to generate an equipment allocation plan for each month of a year of production. The optimization is applied to a long-term plan (Fig. 1) obtained with the software Whittle, which considers a constant production rate for each period. By incorporating the model developed at the production bench scale, the tactical plan and the operational plan can be linked. Data associated with the equipment, benches to be

extracted within the period of 4 years and operating parameters, specified in Sections 4.2 and 4.3 were considered.

4.1 Material to be extracted

The material to be extracted associated with each bench is entered into the model. The data entered also includes: the phase to which it corresponds, the number of the bench (growing with depth), the total tonnage to be extracted, the tonnage of ore present in the bench and the revenue per ton that presents its extraction.

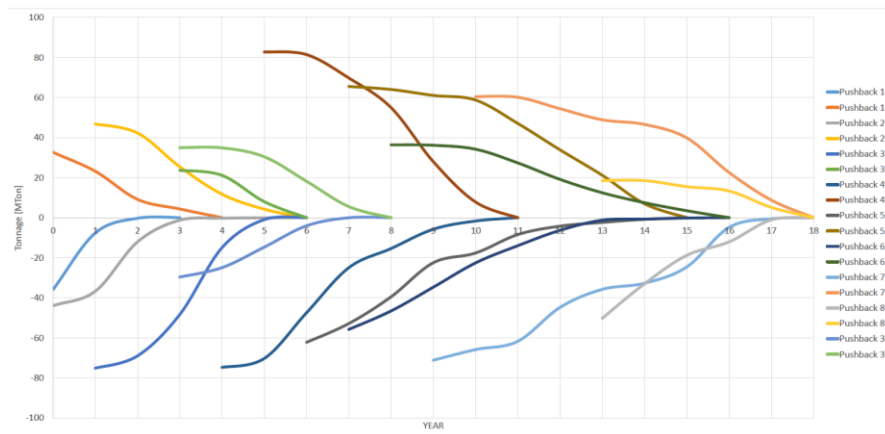


Fig. 1. Graph of depletion of material for the whole life of the mine. In the upper part of the horizontal axis are the mineral tonnages and in the lower the sterile. Year 4 was the basis for the study.

4.2 Loading Equipment

The model sought to complete the production plan with the total extraction of the material entered in each bench; it made decisions regarding shovel selections to minimize costs. The information required for each equipment was: an associated name (POX), the cost of acquisition, the capacity in tons, the utilization and fill factor in percentage and the operational cost in dollars per hour.

Given the way in which the model was built it is necessary to express the operational cost of the equipment in USD / hour. To achieve this, the following assumptions will be considered:

- the fleet of trucks allows the blades to be saturated.
- each truck will be filled with three buckets of the shovel that loads it.

The first assumption was made to express the productivity of the shovel in relation to itself without depending on the cycle of the transport equipment while the second was done to express productivity directly from the bucket capacity of each shovel. This last assumption is quite strong and works well when the shovels chosen for production

do not differ so much in size, but in the case of a considerable difference, the assumption implies that the truck fleet must be different in order for the condition of cargo to be fulfilled.

4.3 General parameters

Data associated with the mining operation: the ore tonnage requirement for the plant's feeding, the discount rate, the bench height and the density of the material were incorporated within the model.

5 Results

5.1 Model Simulations

To facilitate the representation and form in which the results are presented, the results referring to the manual allocation of equipment and that obtained with the model are displayed simultaneously. The following scenarios were considered:

- case A: Manual assignment of equipment selecting the lowest cost per ton.
- case B: Manual assignment of equipment selecting those with the lowest investment.
- case C: Assignment of equipment according to model considering lower investment equipment.
- case D: Assignment of equipment according to model.
- case E: Assignment of equipment according to model with restriction of area.

Scenario D resulted in the lowest global cost because the model did not have restrictions associated with equipment usage nor with space restrictions. Table 1 shows the equipment assignment and the percentage difference in resulting cost between each exercise with exercise D. Despite both scenarios B and C use the same loading equipment the Case C manages to obtain lower costs. This reveals the great impact of the allocation of equipment and the sequence of extraction on costs and how a better strategy for the use of equipment can help reduce the costs of the mine.

Between the cases C and D, it can be seen that by giving the model freedom to choose the equipment to be used, it selects other equipment than equipment chosen manually, thus achieving the production goal in the same way. The difference between case A and B indicate that for the evaluation period of 1 year, the operational cost less relevant than the acquisition cost. This may be reversed when several years of operation are evaluated while the large tonnage to be moved allows the operational cost to become an important part of the total costs.

Table 1. Type and quantity of equipment selected for each scenario: the percentage difference in costs obtained in relation to case D.

Scenarios	Selected Equipment	$\Delta\%$ to scenario D
A	2 P01 – 2 P12	+162.2
B	2 P01 – 2 P04 – P05	+42.4
C	2 P01 – 2 P04 – P05	+14.3
D	2 P01 – 2 P02 – 2 P03	-
E	2 P01 – 2 P03 – P04	+0.6

Fig. 2 shows the production plan generated by the assignment of equipment from scenario E. It can be seen that the material movements have a ramp-up during the first periods before stabilization; this is due to the area restrictions imposed on benches. It is also possible to notice variations in the tons of waste and ore extracted from one month to another. This is because production is conceived as the result of a particular equipment assigned to a specific sector and not as a constant flow of tons. In this way the model manages to capture and better represent what happens in the operation allowing to create more feasible plans.

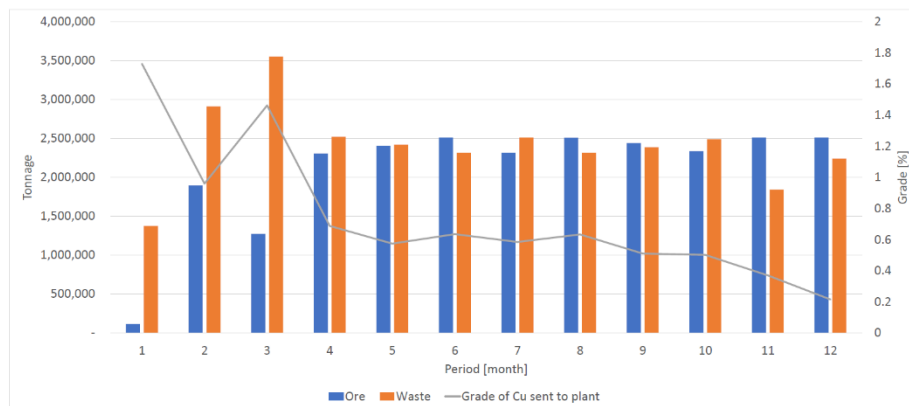


Fig. 2. Production plan for Scenario E.

5.2 Scenario E versus Long Term Plan

The comparison of the results obtained with Scenario E with the production plan obtained in the Long Term planning is shown in Fig. 3, where it can be seen that, for the ore in Pushbacks 2 and 4, the extraction was slower than estimated according to the Long Term plan while Phase 1 does it faster after period 4 (the line graph obtained by the model goes below the Long term line). This may mean that when the plan was put into operation, there were problems with the mineral feed to the plant, especially in the first 4 months.

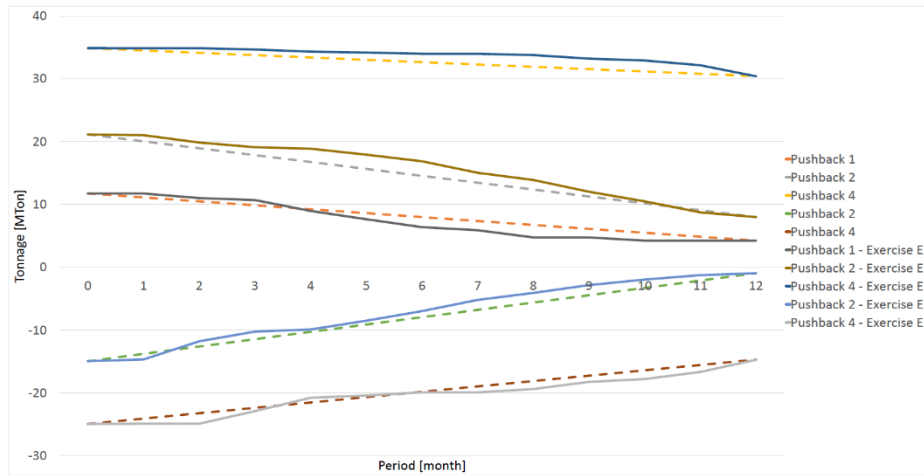


Fig. 3. Material depletion comparison of scenario E with the initial plan. Base case is represented by dotted line while model by the continuous line. Only selected pushbacks are presented given the difference of order of magnitude between the movements among pushbacks.

6 Conclusion

The developed methodology allows to obtain an assignment for a fixed fleet of shovels to the workplaces that meets operational and production restrictions for the short and medium terms. It provides a guide for the planner, which saves time and resources. The model also allows to evaluate different fleet investments options, in the case of greenfield operations, based on their productivity in different work sector.

The consideration of the movement capacity associated with real equipment instead of a defined daily movement allows obtaining a plan that is better adjusted to what actually happens in the mining operation, allowing to estimate revenues and costs more accurately as well as determining the vulnerabilities in the plant feed.

The model also delivers an operational plan that complies with the projected production in the long-term plan, serving as a tool capable of incorporating the characteristics of the mining operation and obtaining a sequencing that serves as a bridge between the different levels of planning

Acknowledgments. I want to thank Gonzalo Nelis, Eleonora Widzyk-Capehart and Andrés Parra, members of the Delphos Mine Planning Laboratory for their help throughout this work. Also, to the director of the laboratory, Nelson Morales, for the trust and support he gave me from the first moment. This work was funded thanks to CONICYT with the Basal Project FB0809 of the AMTC and the CORFO Project 14IDL2 30132.

References

1. A., Le-Feaux R. Galdames B. Vázquez. “Diseño y operaciones de minas a cielo abierto”. In: 1st. Vol. 1. Cap. 13 (2008), 165 -167.
2. H., Bozorgebrahimi. E. Hall R. A. Blackwell G. “Sizing equipment for open pit mining- a review of critical parameters”. In: Mining Technology 3 (2003), 2-3.
3. Newman, Alexandra M. y col. “A Review of Operations Research in Mine Planning”. In: Interfaces 40.3. Ed. por INFORMS (2010), 222-245.
4. Temeng,V.A., Otuonye,F.O. and Frendewey, J. O. “Real-time truck dispatching using a transportation algorithm”, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11, (4), (1997), 203–207.
5. Gurgur, C., Dagdelen, K. and Artittong, S. “Optimization of a real-time multi-period truck dispatching system in mining operations”, International Journal of Applied Decision Sciences, 4, (1), (2011), 57–79.
6. S. P. Upadhyay & H. Askari-Nasab. “Truck-shovel allocation optimization: a goal programming approach”, Mining Technology, 125:2, (2016), 82-92

Loading Equipment Planning Considering Optimization and Simulation for the Fulfilment of a Production Plan in Open Pit Mining

Héctor González, Nelson Morales and Fabián Manríquez

DELPHOS Mine Planning Laboratory, AMTC & DIMIN, Universidad de Chile

ABSTRACT

Open pit mining is a resource and equipment intensive process. The decision of which equipment to use, how many to buy and where they should be operating has a strong impact on the value of the business. In current operations this decision is made manually considering theoretical performance or historical operation data, which do not necessarily adjust to current mine conditions. Due to the complexity of the mining operation it is likely that the manual equipment allocation will not achieve the ideal configuration as the mine evolves and develops, which can result in sub-optimal configurations.

The work developed seeks to provide guidance in the assignment of equipment and in the generation of production plans. By incorporating a simulation model together with an equipment assignment methodology, it was possible to capture the uncertainty of the shovel-truck systems in an operation and achieve an adequate load equipment assignment, which would allow both minimizing operating costs and ensuring compliance with a production plan. Two different exercises were developed, one in which different loading equipment was available and the model could decide which of them to effectively use and another in which there was no freedom of equipment selection, only assignment.

Among the main results obtained is that, for the exercise of varied equipment, an improvement of 83% to 99% is achieved in the total extraction, which is achieved through the inclusion of new equipment that was not in the base case. For the exercise of fixed equipment, it is not possible to exceed 86% extraction of the original plan. However, a new extraction plan is generated (with less material) in which the assignment of base case equipment achieves even 100% extraction of planned material.

INTRODUCTION

The main objective of mine planning is to maximize the benefit of a mining project by defining a sustainable extraction sequence over time. The sequence to be determined will depend on the stage the project is at, which can refer to what portions (phases) of the mine should be extracted at what time period, i.e. the strategic scale; or later at the short-term level, where decisions need to be done in order to do the most efficient utilization of mechanical equipment used for extraction in order to fulfil the strategic plan. Indeed, the proper management of these assets will have a strong impact on costs as well as on the achievement of material extraction goals.

In mining, equipment operates in an environment that is varied and full of interactions. Due to the inherent conditions of open pit operations, a large amount of equipment is required, which is highly mechanized, of gigantic proportions, and must be present throughout the life of the mine. These conditions result in the largest percentage of operational costs in open pit mining being associated with loading and transportation.

The decisions that are made around the equipment in general are made manually and considering theoretical or historical productivities of the equipment. These are considered as a constant within the operation and are not usually updated according to the changes in the work environment.

The high costs involved and the improved planning strategy make the loading and transportation operation a point of high interest for the implementation of tools and improvements. The planner must have at his disposal the adequate tools that allow him to predict the behavior of the operation and be able to anticipate possible problems. In this way, equipment can be used efficiently, optimizing the use of assets as production plans are met.

The main objective of this work is to develop and propose a methodology to assign the loading equipment to the different benches, so that the long-term plan is achieved as best as possible. However, the methodology also aims at improving the robustness of mining plans by incorporating operational uncertainty. This is realized by combining two techniques that are commonly used independently in mine planning: linear optimization model that assigns the equipment, and a simulation that evaluates the assignment and provides feedback to the optimization model to generate a better assignment of loading and transport.

In order to achieve this interaction between models, the following will be carried out: (i) a production plan will be determined based on the assignment of equipment that minimizes the cost of operation; this first solution will consider an estimated productivity in a deterministic manner of the loading equipment; (ii) a simulation model will be constructed from this solution and it will be determined which are the tonnages extracted and the effective productivity reached by the equipment; (iii) this simulated productivity of the equipment will be re-entered in the optimization mode. This process is repeated iteratively until a convergence in the solution is obtained.

METHODOLOGY

General Scheme

The methodology developed in this work can be summarized in three stages:

- Optimization Model: generates a production plan by selecting loading equipment and assigning it to different benches.
- Simulation Model: the production plan is simulated, considering a fleet of trucks, equipment failures and scheduled stops.
- Communication between models: the methodology involves an iteration between the two previous stages in which the production indexes of the equipment will be adjusted. The optimization model first considers an estimated performance of the equipment which is adjusted according to the results of the simulation. This process is outlined in Figure 1.

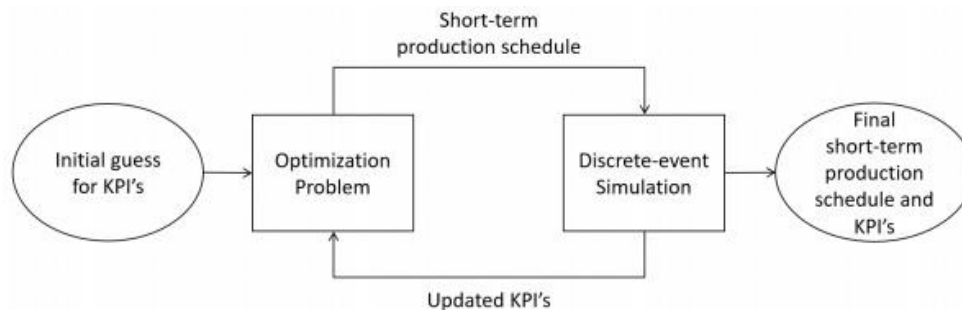


Figure 1 Simulation Optimization iterative framework diagram

Determination of Productive Indicator

The feedback mechanics between the models is directly associated with determining productive indices of the loading equipment in the simulation and then entering them into the optimization model. This stage is of utmost importance, since it is the way in which operational uncertainty will be incorporated into the optimization model. In this way, a solution that is sustainable in the operation will be obtained.

Equation 1 shows in a simplified way the calculation of the adjustment factor "Utilization". The simulated productivity of the loading equipment is obtained from the results of the optimization model, while the expected productivity is the first guess of the productivities, which is calculated based on the catalogues of current equipment and operational factors, with which the optimization model works.

$$Utilization_{shovel} = \frac{TPH_{shovel}^{simulated}}{TPH_{shovel}^{expected}} \quad (1)$$

The Utilization is entered into the optimization model of the next iteration, which uses it to calculate the expected productivity with which it going to build the schedule production. In this way, each production plan that is calculated incorporates the results of the simulation of the previous plan.

Optimization Model

The optimization model used is described in detail in "Optimal Selection and Assignment of Loading Equipment for the Compliance of an Open Pit Production Plan". Figure 2 presents an overview of the functioning of the optimization model.

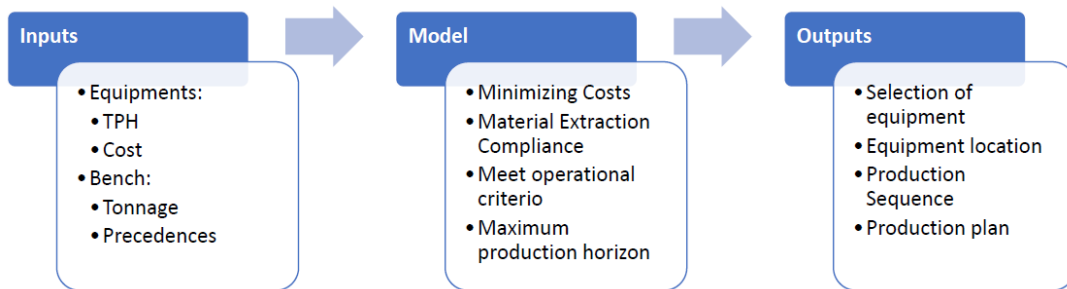


Figure 2 Functioning of the optimization model

The model allows the option of working with defined loading equipment or with varied equipment. In the first, the fleet of equipment to be used is already defined, while in the second, the model can choose which equipment to use from a larger catalogue.

Simulation Model

The simulation software used corresponds to DSIM Open Pit, a tool developed by the Delphos Mining Planning laboratory.

The simulation model is loaded in each iteration with the chosen equipment and with the production plan resulting from the optimization model. Figure 3 shows how the model works.

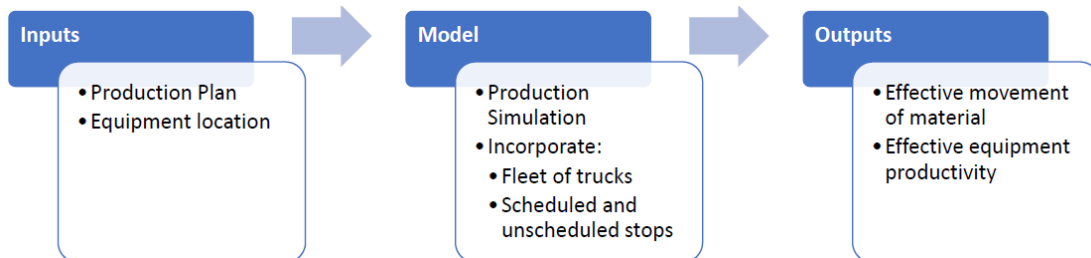


Figure 3 Functioning of the simulation model

The monthly tonnages of the plan are adjusted to daily production scale in order to make simulation possible. 12 representative days are simulated, each of one month.

The effective productivity obtained from each team is summarized according to the phase in which they worked. In this way, the utilization factor is obtained, which is used to adjust the productivity of the equipment of the next iteration in the optimization model.

Case Study

The case consists of the sequencing of one year of production. The basic elements of this plan are the benches, of which the tonnage and destination of each material present is known. The optimization model solves the assignment of the loading equipment to the different banks of this production year. With each iteration, it is possible to vary both the assignment of the equipment and the extraction sequence of the benches, always considering the precedences between them.

Simulation Layout

In order to carry out the simulation, we considered the information of the routes provided in the data together with the topography of the project. They will be considered

- Three dumps, each with its associated pushbacks.
- Two workshops, in which the teams carry out maintenance according to the failure.
- Two casinos, in which the teams perform shift changes and snacks.

Figure 4 present the layout considered for the simulation, which has four production phases with different loading fronts and multiple destinations for the material.

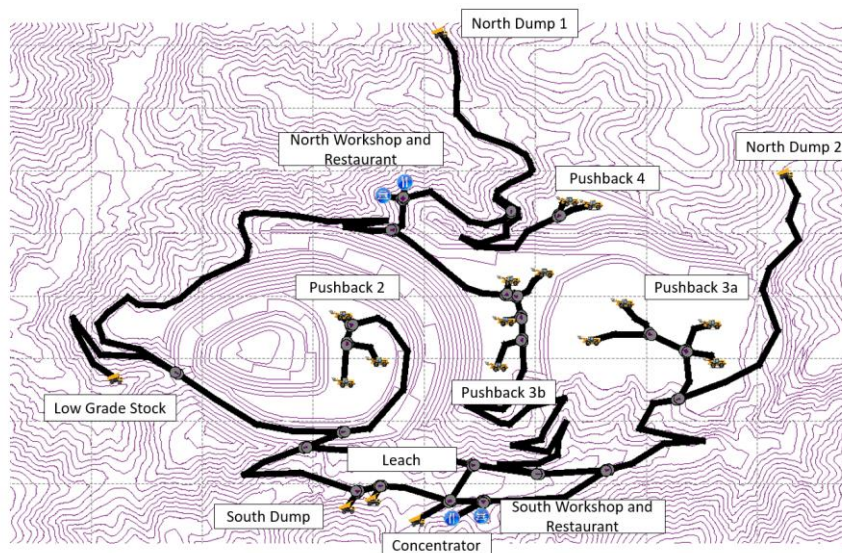


Figure 4 Production Layout for Simulation

RESULTS AND DISCUSSION

The exercises carried out were two: one in which the teams selected could vary between an iteration and another in which the fleet was defined for all of them.

In order to present the evolution in each iteration, two types of results will be presented: the comparison between expected and actual productivity and the mineral depletion graph.

The difference between expected and effective productivity will be shown along with the number of teams selected, the total cost of the case (including cost of operation and purchase of equipment), and compliance with the plan.

The ore depletion graph is presented with the remaining material from each phase for the planned and simulated case.

Comparative Parameters

Table 1 presents the comparative differences obtained between the base case and the best iteration. The total cost represents the sum between the acquisition cost of the shovels and the production cost (the equipment has different costs per ton extracted). Compliance with the plan compares the tonnages scheduled by the optimization model with the tonnages extracted in the simulation. TPH Difference represents the difference between the expected productivity and the effective productivity, if it is negative it means that the effective productivity is less than the expected one and therefore it was overestimated.

Table 1 Comparative Parameter for Variable Equipment

Parameter	Base Case	Best Iteration
Total Cost [\$]	10,719,519	21,176,577
N° of Shovel [#]	5	9
Plan fulfilment [%]	83	99
TPH Difference [%]	-44	-0.3

From Table 1 it can be seen that in the best iteration, the equipment extraction and assignment plan created by the optimization model allows the loading equipment to reach the expected productivity. In this way, an almost total extraction of the planned material is achieved.

When considering the theoretically determined TPH in the base case the estimated cost is 10,719,519 USD. However, productivity is overestimated so that only 83% compliance is achieved. On the other hand, if the methodology is used, the adjustment in the iterations allows to obtain the real

productivity of the equipment determining that it is necessary to increase the fleet (and therefore the costs amount to 21,176,577 USD) to achieve 99% compliance with the plan.

The problem to be solved with the methodology considering the fixed equipment fleet is a little different from the original one. As seen in Table 1, the original fleet does not provide enough for total extraction, therefore, what is sought is a new production plan that is achievable with the original fleet. The results are shown in Table 2.

Table 2 Fixed equipment results

Parameter	Base Case	Best Iteration
Total Cost [\$]	10,719,519	9,997,097
Planned Tonnage [daily adjustment]	1,799,835	1,219,547
Plan fulfilment [%]	83	99

In table 2 it can be seen that the original plan cannot be reached and only 83% of the plan is extracted. However, the methodology allows to determine a new production plan with which 99% of extraction is reached in the case shown. Other iterations reached 100% extraction, but the planned tonnage was lower.

With the two exercises carried out, it can be understood that the base case plan is unfeasible to extract with the initial equipment. In the exercise with variable equipment the methodology leads to incorporate new equipment to achieve total extraction while in the exercise of defined equipment the tonnage to be extracted is reduced to achieve total extraction.

Depletion Graph

The depletion graphs represent how much remaining tonnage is in each phase as time passes. In this case, for each phase, the planned production (continuous line) is compared with the actual production (line and point).

These curves are directly related to the equipment operating in each sector, in the sense that the slope of the curves represents the productivity of the equipment in that sector at that specific moment.

In this case, the curve above the other is extracted slower, ie the productivity of that specific phase is lower.

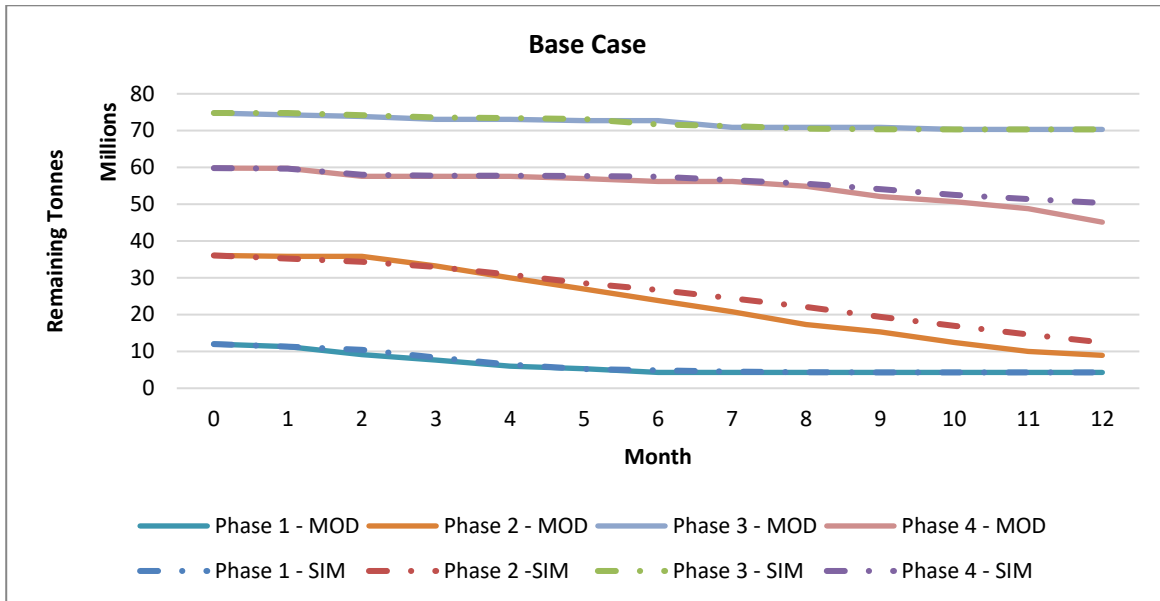


Figure 5 Depletion graph – Base Case

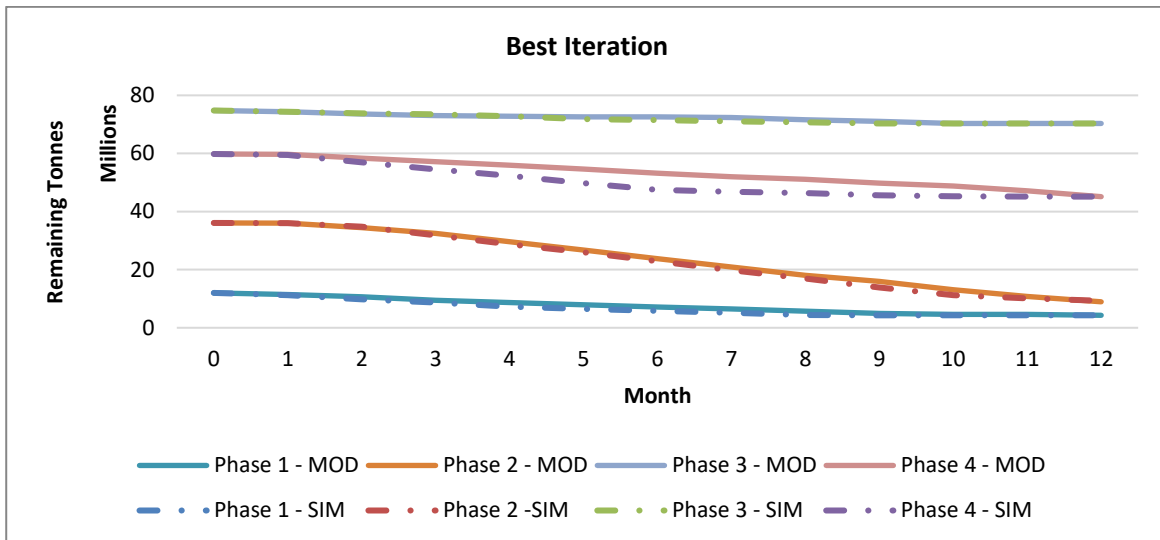


Figure 6 Depletion graph – Best Iteration

In Figure 5 it can be seen that for Phases 2 and 4 the simulation curve is above that of the optimization model. This means that the rate at which the material is actually being extracted is lower than expected according to the planning. This means that at the end of all periods there is still material remaining in the phases, which can prejudice the planning for subsequent periods.

Even more serious is the fact that the plan generated in the base case involves a smaller amount of extracted material which can negatively affect the feed to the plant.

On the other hand, in Figure 6 you can see that the simulation curves are now lower than that of the optimization model. This implies that the resulting extraction rate is higher than the planned one. In this way the almost total extraction of the planned material is achieved. This is a direct consequence of the better estimation of the productivity of the equipment and the assignment of suitable work locations. The implemented methodology allowed to pass from a situation of delay of material sent to the plant and with remaining material at the end of periods to a better situation where all the material is extracted in the stipulated time and the plant is fed as planned.

CONCLUSION

The proposed methodology permits the correct feedback between the optimization model and the simulation, allowing the planned material movements to be reached in the simulation.

When not considering the methodology, the error in the estimation of the productivities was 44% on average, while when considering it, it drops to 10%.

This decrease in error implies an increase in compliance with the plan, going from 83% in the base case to 99%. The final allocation manages to improve the estimated extraction rate and get closer to full compliance.

The methodology also allows the construction of production plans whose compliance is achievable for a given fleet.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of a Master research, which was supported by the Advanced Mining Technology Center (AMTC) and the CONICYT Basal Project under Grant FB0809. I also want to personally thank Nelson for his trust and support, to Fabian for his help in the beginning of this work and Consuelo, without his help this work wouldn't have been possible.

REFERENCES

- Askari-Nasab, H. and Upadhyay, S. P (2016) 'Truck-shovel allocation optimisation: a goal programming approach', *Mining Technology*, 125, 82-92.
- Askari-Nasab, H and Torkamani, E. (2013) 'Truck-Shovel Operational Planning Using Discrete Event Simulation, in Application of Computers and Operations Research in Mineral Industry', 36th APCOM, Porto Alegre, Brazil, 515-526.
- Tabesh, M. Mieth, C. Askari-Nasab, H. (2014) 'International Journal of Mining and Mineral Engineering', Inderscience Publishers, 125, 82-92

Bibliografía

- Askari-Nasab, H. y E. Torkamani (2013). «Truck-Shovel Operational Planning Using Discrete Event Simulation, in Applications of Computers and Operations Research in Mineral Industry». En: *36th APCOM Symposium*, págs. 515-526.
- Askari-Nasab, H. y E. Torkamani (2015). «A linkage of truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete-event simulation». En: *International Journal of Mining and Mineral Engineering* 6, pág. 97.
- Banks, J. (1984). «Discrete Event System Simulation». En: *Pearson Education India*.
- Blackwell, G.H. (1999). «Estimation of large open pit haulage truck requirements». En: *CIM Bull* 92(1028), 143-149.
- Bozorgebrahimi, E., R. A. Hall y G. H. Blackwell (2003). «Sizing equipment for open pit mining - a review of critical parameters». En: *Mining Technology* 3, págs. 2-3.
- Castro, R. (2013). «Apuntes: MI4070 Fundamentos de Tecnología Minera». En: 3rd. Vol. 1. Universidad de Chile. Cap. 10, págs. 121-127.
- CODELCO (2005). *Norma ASARCO*. Documento Interno, División Codelco Norte. Ver. Pre-print.
- Darling, P. (2013). «Mining Engineering Handbook». En: *Mining Engineering Handbook*. 3rd. Vol. 2. Society for Mining Metallurgy y Exploration inc. Cap. 10, págs. 936-940.
- García, E., H. García y L. Cárdenas (2006). «Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel». En: *Pearson Education México*.
- Goodman, G. y C. Sarin (1988). «Using mathematical programming to develop optimal overburden transport strategies in a surface coal mining operation.» En: *Internat. J. Surface Mining Reclamation Environ.* 2, págs. 51-58.
- Gurgur, C., K. Dagdelen y S. Artittong (2011). «Optimisation of a real-time multi-period truck dispatching system in mining operations». En: *International Journal of Applied Decision Sciences* 4, págs. 57-79.
- Hartman, H. L. y J. M. Mutmanský (2002). «Introductory Mining Engineering». En: *Mine and Mill Equipment cost*. 2nd. Vol. 1. John Wiley Sons.
- Humphrey, J.D. y J.D. Wagner (2011). «Mechanical Extraction, Loading, and Hauling». En: *Mining Engineering Handbook*. 3rd. Vol. 2. Society for Mining Metallurgy y Exploration inc. Cap. 10, págs. 903-929.
- Hustrulid, W., M. Kuchta y R. Martin (2013). «Production Planning». En: *Open pit Mine Planning and Design*. 3rd. Vol. 1. CRC Press/Balkena. Cap. 6, págs. 628-631.
- Johnson, T. B. (1968). «Optimum open-pit mining production scheduling». PhD. thesis. Berkeley: University of California.

- Krause, A. y C. Musingwini (2007). «Modelling open pit shovel-truck systems using the Machine Repair Model». En: *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 107, 469-476.
- Lerchs, Helmut e Ingo F. Grossmann (1965). «Optimum Design of Open-Pit Mines». En: *Transactions C.I.M.* LXVIII, págs. 17-24.
- Najor, J. y P. Hagan (2006). «Capacity constrained production scheduling.» En: *Proc. 15th Internat. Sympos. Mine Planning Equipment Selection (MPES)* 7, págs. 1173-1178.
- Naoum, S. y A. Haidar (2000). «A hybrid knowledge base system and genetic algorithms for equipment selection.» En: *Engrg. Construction Architectural Management* 7, págs. 3-14.
- Newman, A. M. y col. (2010). «A Review of Operations Research in Mine Planning». En: *Interfaces* 40.3. Ed. por INFORMS, págs. 222-245.
- Parra, A. (2006). «Generación y Aplicación de un Sistema de Análisis para Planes de Producción». Degree. thesis. Santiago: Universidad de Chile.
- Pérez, J. (2017). «Metodología de estimación de producción en minería subterránea selectiva atendiendo a incertidumbre operacional y parámetros geomecánicos». Master thesis. Santiago: Universidad de Chile.
- Soumis, F., J. Ethier y J. Elbrond (1989). «Truck dispatching in an open pit mine.» En: *Internat. J. Surface Mining Reclamation Environ.* 3, págs. 115-119.
- Upadhyay, S. P. y H. Askari-Nasab (2016). «A multi-step approach to long-term open-pit production planning». En: *Mining Technology* 125, págs. 82 -92.
- Valdez, F., M. Lanata y W. Orosco (2011). *Programación Lineal en Gestión de Operaciones Mineras*. Ver. Preprint.
- Weintraub, A. y col. (1987). «truck dispatching system for a large open pit mine». En: *Proc. 11th Internat. Conf. Oper. Res. North Holland Amsterdam*, págs. 650-662.

Anexo A

Simulación

En esta sección se presenta parte de los datos mas relevantes utilizados en la simulación.

A.1. Número de Camiones

Los siguientes elementos fueron considerados para el cálculo de camiones para las simulaciones realizadas. En la Tabla [A.2](#) se muestra en número de camiones mensuales. Para las simulaciones se escogió el número mayor de camiones requeridos.

Tabla A.1: Perfil de velocidad para camión de 288 [ton]

Camino	Estado Camion	Velocidad [km/h]
Horizontal	Vacio	25
Horizontal	Lleno	13.86
Bajando	Vacio	28.28
Bajando	Lleno	25
Subiendo	Vacio	25
Subiendo	Lleno	13.89

Tabla A.2: Número de camiones requeridos para cada mes de acuerdo al cálculo manual

Camión	Tiempo de espera	Meses											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
288 [ton]	Asociado a la productividad de la pala	11	23	29	23	28	28	24	25	24	22	28	25

Tabla A.3: Parámetros de Equipos de Carguío

Pala	Modelo CAT	Costo Capital [MUSD]	Capacidad [ton]	Costo Operacional [USD/hora]
P01 - P14	6015/6015 FS	\$1.32	14	106
P02 - P15	6015B	\$1.72	16	162
P03 - P16	6018/6018 FS	\$1.93	20	182
P04 - P17	6020B	\$2.67	24	225
P05 - P18	6030/6030 FS	\$4.58	32	363
P06 - P19	6040/6040 FS	\$5.28	44	434
P07 - P20	6060/6060 FS	\$6.41	52	516
P08 - P21	6050/6050 FS	\$7.19	67	632
P09 - P22	6090 FS	\$15.16	104	1,105
P10 - P23	7295	\$8.70	46	212
P11 - P24	7395	\$10.52	64	253
P12 - P25	7495 HD	\$11.82	81	283
P13 - P26	7495 HF	\$16.25	101	430

Tabla A.4: Tiempo de carguío del camión de 288 [ton] para los distintos equipos de carguío

Equipo	Tiempo de Carguío
P01 - P14	10 min 16 seg
P02 - P15	9 min 4 seg
P03 - P16	7 min 21 seg
P04 - P17	6 min 4 seg
P05 - P18	4 min 36 seg
P06 - P19	3 min 20 seg
P07 - P20	2 min 59 seg
P08 - P21	2 min 18 seg
P09 - P22	1 min 29 seg
P10 - P23	4 min 55 seg
P11 - P24	3 min 31 seg
P12 - P25	2 min 47 seg
P13 - P26	2 min 4 seg

Tabla A.5: Tonelajes de los bancos a extraer

Fases	Banco	Tonelaje Total
2	14	2,109,879
2	15	1,986,257
2	16	1,876,662
2	17	1,728,332
3a	9	5,989,359
3a	10	6,184,217
3a	11	5,833,727
3a	12	4,882,407
3a	13	4,253,745
4	1	100,816
4	2	314,533
4	3	602,770
4	4	933,899
4	5	1,176,520
4	6	1,335,261
3b	7	2,214,944
3b	8	2,505,574
3b	9	2,896,096
3b	10	3,323,287
3b	11	3,746,793

Tabla A.6: Distancia entre Fases y Destinos para camión Cargado

Estado del Camión = Cargado		Distancia [metros]			
Destino	Condicion del Camino	Fase 2	Fase 3a	Fase 3b	Fase 4
Botadero N1	<i>Subiendo</i>	-	500.6	-	-
	<i>Plano</i>	-	383.5	-	-
	<i>Bajando</i>	-	859.3	-	1567.4
Botadero S1	<i>Subiendo</i>	829.2	-	-	-
	<i>Plano</i>	55.4	-	-	-
	<i>Bajando</i>	570.9	-	-	-
Botadero N2	<i>Subiendo</i>	-	-	967.2	-
	<i>Plano</i>	-	-	125.0	-
	<i>Bajando</i>	-	-	165.7	-
Stock Ig	<i>Subiendo</i>	709.5	-	172.5	-
	<i>Plano</i>	-	383.5	125.0	-
	<i>Bajando</i>	1202.0	2427.5	2935.0	-
Leach	<i>Subiendo</i>	894.7	95.0	-	-
	<i>Plano</i>	44.4	-	281.5	-
	<i>Bajando</i>	570.9	2194.9	788.8	-
Planta de Procesamiento	<i>Subiendo</i>	1225.2	114.2	114.2	-
	<i>Plano</i>	-	-	281.5	-
	<i>Bajando</i>	570.9	1978.6	525.0	-

Tabla A.7: Distancia entre Fases y Destinos para camión Vacío

Estado del Camión = Vacío		Distancia [metros]			
Destino	Condicion del Camino	Fase 2	Fase 3a	Fase 3b	Fase 4
Botadero N1	<i>Subiendo</i>	-	859.3	-	1567.4
	<i>Plano</i>	-	383.5	-	-
	<i>Bajando</i>	-	500.6	-	-
Botadero S1	<i>Subiendo</i>	570.9	-	-	-
	<i>Plano</i>	55.4	-	-	-
	<i>Bajando</i>	829.2	-	-	-
Botadero N2	<i>Subiendo</i>	-	-	165.7	-
	<i>Plano</i>	-	-	125.0	-
	<i>Bajando</i>	-	-	967.2	-
Stock Baja Ley	<i>Subiendo</i>	1202.0	2427.5	2935.0	-
	<i>Plano</i>	-	383.5	125.0	-
	<i>Bajando</i>	709.5	-	172.5	-
Lixiviación	<i>Subiendo</i>	570.9	2194.9	788.8	-
	<i>Plano</i>	44.4	-	281.5	-
	<i>Bajando</i>	894.7	95.0	-	-
Planta de Procesamiento	<i>Subiendo</i>	570.9	1978.6	525.0	-
	<i>Plano</i>	-	-	281.5	-
	<i>Bajando</i>	1225.2	114.2	114.2	-

A.2. Ponderación de Tonelajes

En la siguiente sección se muestra la ecuación utilizada para determinar los tonelajes diarios representativos a simular para cada mes.

- $FR_{destino,banco}$ = fracción del banco total enviado al destino.
- $TonBanco_{destino,banco}^{total}$ = tonelaje total enviado al destino del banco.
- $TonBanco_{banco}^{total}$ = tonelaje total del banco.
- $TPM_{pala,mes,banco,destino}$ = Toneladas que la pala debe mover en un mes desde un banco a cierto destino.
- $TPD_{mes,pala,banco,destino}$ = Tonelaje equivalente diario que la pala debe mover en el mes desde un banco a cierto destino.

$$FR_{destino,banco} = \frac{TonBanco_{destino,banco}^{total}}{TonBanco_{banco}^{total}} \quad (A.1)$$

$$TPD_{mes,pala,banco,destino} = \frac{FR_{destino,banco} \cdot TPM_{pala,mes,banco,destino}}{30} \quad (A.2)$$

A.3. Selección de Réplicas

Los siguientes gráficos fueron utilizados para determinar el número de réplicas a utilizar. En la Figura [A.2](#) se aprecia la diferencia en tonelajes al ir incrementando el número de replicas consideradas. Cuando la diferencia es menor que el mínimo error de las simulaciones (la capacidad de un camión) se consideraron réplicas suficientes. En este ejercicio se utilizaron 50 réplicas.

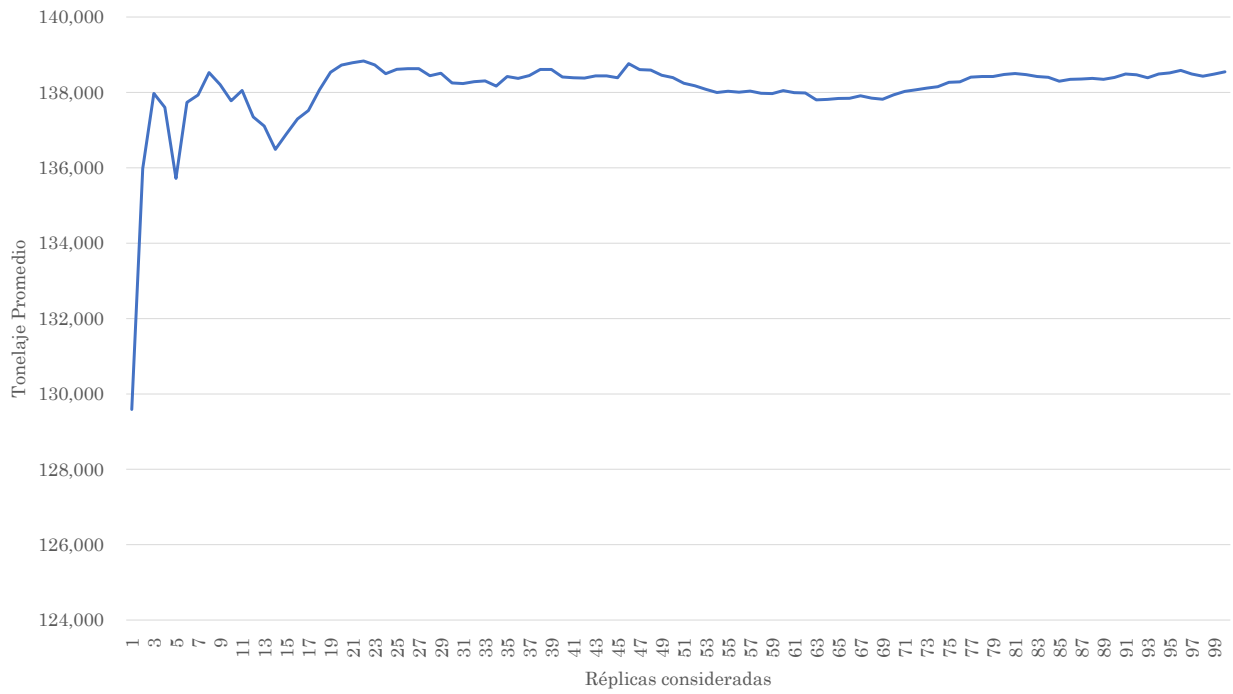


Figura A.1: Tonelaje promedio considerando distintos números de réplicas

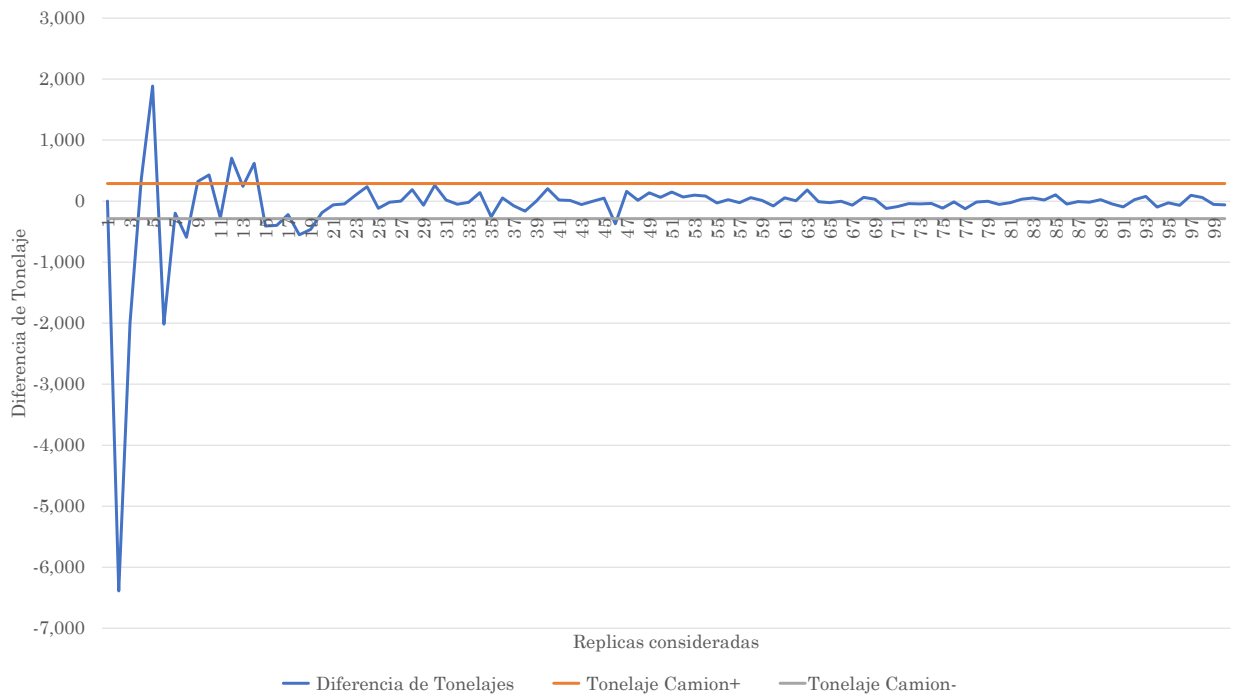


Figura A.2: Diferencia entre tonaje promedio considerando distintos números de réplicas

A.4. Plan de Producción

En esta sección se muestran los gráficos de producción entregados por el modelo de optimización. La Figura A.3 es del Caso Base, es decir, el caso en el que no se realizó un ajuste mediante las iteraciones, mientras que el de la Figura A.4 muestra el plan que alcanzó el mejor cumplimiento.

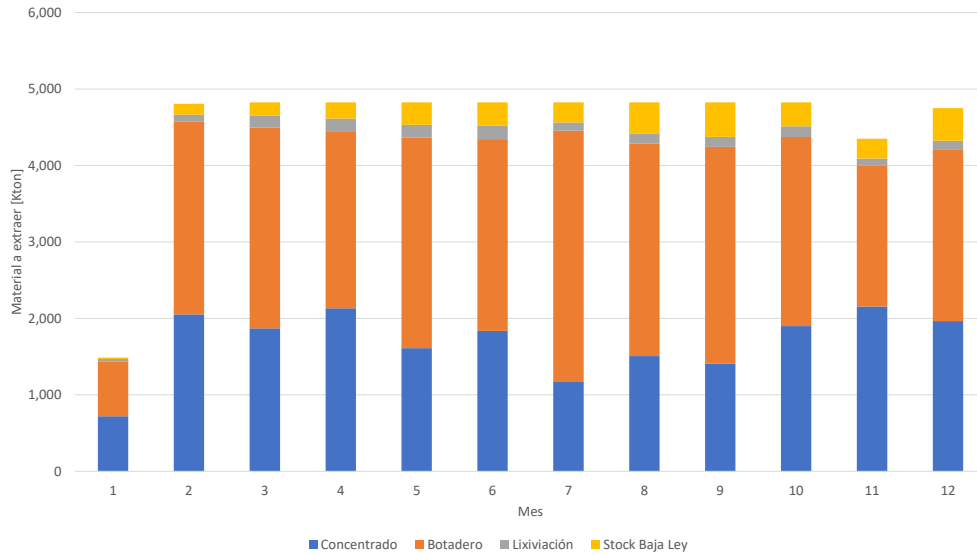


Figura A.3: Plan de producción del caso base (primera iteración), alcanza un cumplimiento del 83 %

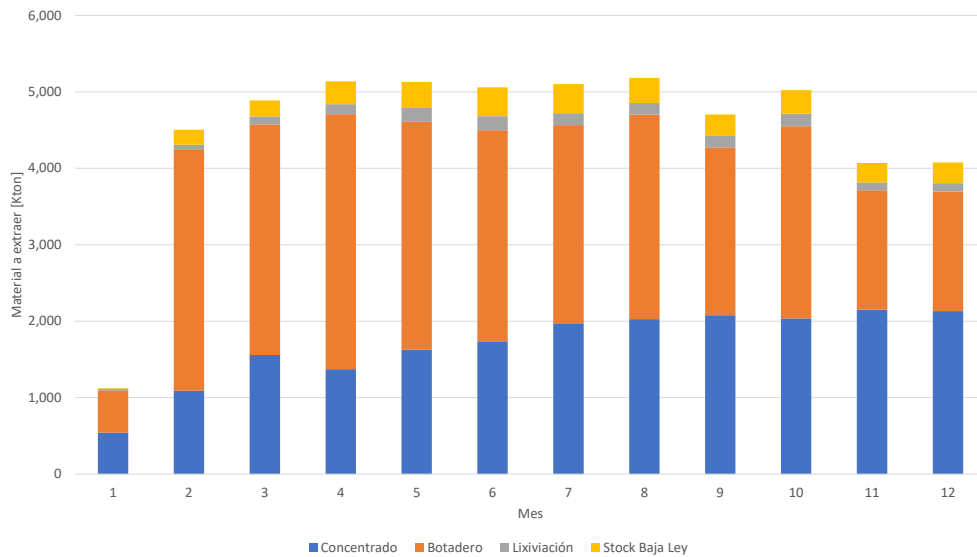


Figura A.4: Plan de producción de la mejor iteración, alcanza un cumplimiento del 99 %