



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

SELECCIÓN Y ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE CARGUÍO PARA EL
CUMPLIMIENTO DE UN PLAN DE PRODUCCIÓN EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS PARRA RETI
JUAN QUIROZ RETAMAL

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME
FECHA: MAYO 2017
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

**SELECCIÓN Y ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE EQUIPOS DE CARGUÍO
PARA EL CUMPLIMIENTO DE UN PLAN DE PRODUCCIÓN EN
MINERÍA A CIELO ABIERTO**

La minería a cielo abierto es un proceso que requiere de un uso intensivo de recursos, dado que la rentabilidad del negocio está fuertemente relacionada con la magnitud del tonelaje extraído. por lo cual se hace necesario el uso de equipos de grandes dimensiones para extraer y transportar el material proveniente desde la mina.

La decisión de qué equipos utilizar, cuántos comprar y dónde deben estar operando impacta fuertemente en el valor del negocio minero y, hasta ahora, ha sido realizada en general sin la ayuda de herramientas optimizadoras por parte de los planificadores. Por otro lado la estimación de los movimientos de material entregada por los software actuales de planificación se basan básicamente en una capacidad de movimiento de material definida en toneladas extraídas por día la cual no representa necesariamente lo que sucede en la operación.

La creación, planteamiento y resolución de un problema de optimización que responda las tres preguntas mencionadas anteriormente es la gran motivación de este trabajo, el cual busca determinar la asignación pala-banco que minimice los costos de operación. En este sentido, se busca también que la asignación de equipos obtenida por el modelo de optimización logre estimar un plan de producción que se ajuste de mejor manera a la realidad. Para alcanzar este realismo se considerarán distintos factores operacionales y restricciones entre las cuales se destacan la disponibilidad mecánica, utilización, restricciones de espacio y precedencia entre bancos de distinta fases.

Para el desarrollo del trabajo se dispuso de un modelo de bloques proveniente de un proyecto real el cual poseía el plan de producción de toda la vida de la mina, incluyendo periodos de extracción, fases a las que pertenecen y destinos de los bloques. De todo el proyecto se escogió un año de producción para el cual se asignaron los equipos de manera manual y mediante el modelo, con el fin de comparar los resultados y planes obtenidos. El modelo desarrollado puede asignar equipos con los que ya se cuentan (flota actual) como también decidir la compra de equipos nuevos.

Se obtuvo que los costos obtenidos por la asignación del modelo eran inferiores que los resultantes en la asignación manual. Se realizaron diversos experimentos considerando equipos fijos para asignación, ingresos por toneladas y restricciones de área para la operación y para todos los casos se obtuvieron fluctuaciones en los tonelajes extraídos mes a mes que no son previstas en la planificación con movimientos diarios constantes. La presencia de estas fluctuaciones puede indicar que aún se pueden considerar un mayor números de variables dentro la planificación que pueden permitir construir planes más robustos con el fin de garantizar una operación confiable en términos de producción y alimentación a la planta.

**ABSTRACT OF THE THESIS TO OBTAIN
THE GRADE OF MINING ENGINEER
BY: HÉCTOR ANTONIO GONZÁLEZ RIQUELME
DATE: MAY 2017
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

**OPTIMAL SELECTION AND ASSIGNMENT OF LOADING EQUIPMENT
FOR THE COMPLIANCE OF AN OPEN PIT PRODUCTION PLAN**

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 many equipments to buy and where they should be operating, strongly impacts the value of the mining business. So far, mine planning has been done without the help of optimizing tools, and the estimation of the material movements are given by different planning software based on a movement capacity of certain material in tonnes extracted per day, which not necessarily represent what happens in the operation.

The motivation of this work is to build an optimization model that solves the problem previously mentioned, which aims to determine the shovel-bench allocation that minimizes the costs of the operation. Also, this work aims to find that the equipment allocation obtained by the optimization model can estimate a production plan that fits better to reality. To achieve this, several operational factors and restrictions are considered, among which mechanical availability, utilization, space restrictions and precedence among benches of different phases are highlighted.

To achieve this, a block model from a real project is studied with a production plan considering the entire life of mine, including extraction periods, phases and different destinations for the extracted blocks.

A year of production was chosen from the entire project, for which the equipment was assigned manually, in order to compare the results and production plans obtain by the model. This model can decide how to assign the fleet and which equipment to buy if necessary.

It was shown that costs obtained by the model are lower to those obtained by the manual assignment. Several experiments were carried out considering the fixed equipment for the allocation, the revenues per ton and the area constraints for the operation, and for all cases fluctuations were obtained in the tonnages extracted monthly that were not prevented in the mine plan on a daily basis. The presence of these fluctuations can indicate that a greater number of variables can still be considered within the planning that can allow to build more robust plans in order to guarantee a reliable operation in terms of production and feed to the plant.

“Un noble espíritu agradece al hombre más pequeño” - Jeremías Springfield

Para mi familia y amigos, todo.

Agradecimientos

A mi familia, gracias a su apoyo estoy acá. A mi madre que siempre me incentivó por los estudios y me ayudó y acompañó en los momentos difíciles. A mi padre, que siempre estuvo para ayudarme en lo que necesitara y siempre se sacrificó para que no nos faltara nada. A mi hermano por todos los momentos que me acompañó en todos estos años. A mis abuelos, siempre estuvieron ahí. Todo se agradece.

A mis amigos de Villarrica; Pablo Mora, Sebastián Contreras, Joaquín Suazo y Cristian Lara, con quienes aprendí que para la amistad no importa la distancia ni el tiempo.

A mi tío Cristian, por recibirme en su casa los dos primeros años de la carrera. Por apoyarme y motivarme a superarme a mi mismo en los estudios y en la vida.

A mis amigos de La Pasta, en especial a Víctor Neira, Esteban Figueroa, Taky Parvex, Tomás Herrera y Sebastián Carrillo. Con algunos fuimos amigos desde el primer día y con otros nos conocimos después, pero siempre estuvieron ahí cuando los necesitaba.

A mis amigos músicos, al Grupo Abelián, a Scumbag Jam y a Macedonia. Por todos los buenos momentos en ensayos, tocatas y reuniones. La música me ha acompañado y me acompañará siempre gracias a ustedes.

A Diablos Ingeniería, en especial a Diego Olivares, Juan Ramos y al entrenador Cristian López, por recibirme en el club y que a pesar de mi presencia intermitente debido a mi lesión siempre soy bienvenido a jugar cuando puedo.

A mi profesor guía, Nelson, a pesar de mis tropiezos iniciales nunca dejó de confiar en mi.

A mis amigos y gente del Laboratorio Delphos, siempre puedo contar con su apoyo.

A Valeria, por su apoyo y cariño incondicional a lo largo de la carrera. Por motivarme a mejorar y a crecer como persona. Muchas gracias por todo.

A todos ustedes, Gracias.

Este trabajo fue financiado gracias a CONICYT con el Proyecto Basal FB0809 del AMTC y al Proyecto CORFO 14IDL2 30132

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances	2
1.3. Estructura del trabajo	3
2. Antecedentes	4
2.1. Planificación minera	4
2.1.1. Horizontes de Planificación	5
2.1.2. Planificación tradicional en minería a cielo abierto	5
2.2. Operación de Carguío y Transporte	7
2.2.1. Carguío y Transporte	7
2.2.2. Equipos de Carguío	8
2.2.3. Selección de equipos de carguío	10
2.3. Consideraciones geométricas	13
2.3.1. Geometría Básica de Bancos	13
2.3.2. Acceso al Mineral	15
2.3.3. Proceso de Expansión	17
2.3.4. Espacio mínimo de operación	20
2.4. Gráficos de Agotamiento de Mineral	21
2.5. Programación Lineal	22
2.5.1. Programación Lineal aplicada en minería	23
3. Metodología	25
4. Desarrollo de Modelo de Optimización	27
4.1. Consideraciones	27
4.1.1. Variables	28
4.1.2. Parámetros	29
4.1.3. Ejemplo de funcionamiento	30
4.2. Formulación del Problema	31
5. Exploración y obtención de datos	34
5.1. Modelo de bloques	34
5.1.1. Gráfico Serrucho	35
5.1.2. Material a Mover	35

5.2.	Equipos de carguío	36
5.3.	Consideraciones para la asignación Manual	38
5.4.	Incorporación de datos al Modelo	39
5.4.1.	Parámetros Generales	39
5.4.2.	Características de Equipos de Carguío	40
5.4.3.	Fases y bancos	41
5.4.4.	Horizonte temporal de evaluación	42
5.4.5.	Precedencias	43
6.	Análisis y Resultados	44
6.1.	General	44
6.2.	Extracción de Material por fase	45
6.2.1.	Fase 1	45
6.2.2.	Fase 2	47
6.2.3.	Fase 3	48
6.2.4.	Fase 4	49
6.3.	Planes de Producción	50
6.4.	Gráfico Serrucho	54
6.4.1.	Tasa de hundimiento	56
6.5.	Tiempos de Cómputo	57
6.6.	Asignación de Equipos	57
7.	Conclusiones y trabajo futuro	59
7.1.	Conclusiones	59
7.2.	Trabajo Futuro	60
	Bibliografía	61
	Anexo A. Obtención de Datos	62
A.1.	Equipos de carguío	62
A.2.	Equipos de Transporte	63
	Anexo B. Resultados	64
B.1.	Planes de Producción	64
B.2.	Gráficos Serruchos	67

Índice de tablas

5.1. Material a mover - Año 4	36
5.2. Parámetros de Equipos de Carguío	37
5.3. Producción de equipos de carguío	38
5.4. Área mínima de operación para cada equipo de carguío	39
5.5. Parámetros	40
5.6. Palas	41
5.7. Fases y bancos	42
5.8. Periodos	43
5.9. Precedencias entre fases	43
6.1. Resultados generales	45
6.2. Horas asignadas por equipo en la Fase 4	49
6.3. Bancos extraídos por periodo	56
6.4. Tiempos de resolución y Gap	57
6.5. Ejemplo de asignación en horas por periodo	58
A.1. Parámetros equipos de transporte	63

Índice de ilustraciones

2.1.	Componentes de una pala hidráulica. <i>Fuente: Castro (2013).</i>	9
2.2.	Componentes de una pala eléctrica. <i>Fuente: Castro (2013).</i>	10
2.3.	Ciclo de selección de tamaños de equipos <i>Fuente: Bozorgebrahimi, E. Hall (2003).</i>	11
2.4.	Tipo de equipo en función del tamaño de balde. <i>Fuente: Darling (2013).</i> . .	12
2.5.	Componentes básicos de un banco. Vista de perfil. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	14
2.6.	Banco de trabajo con equipos operando, la pala se encuentra cargando un camión aculataado mientras un camión ya cargado se dirige a su destino. Vista de perfil. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	15
2.7.	Trabajo en rampa de acceso, la pala se encuentra cargando un camión. Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	16
2.8.	Trabajo en rampa de acceso con dos camiones, mientras uno de los camiones está siendo cargado por la pala el otro se aculata en el costado libre al lado de la pala. Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	17
2.9.	Evolución de banco de trabajo: en la primera etapa el camión se detiene y aculata antes de entrar a la rampa; en la segunda, el camión entra y se aculata dentro del banco de trabajo; en la tercera ya se tienen dos palas en operación con sus respectivos camiones siendo cargados. Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	18
2.10.	Pala trabajando según el método de corte frontal. Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	19
2.11.	Pala trabajando según el método <i>Drive-by</i> . Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	19
2.12.	Pala trabajando según el método de cortes paralelos. Vista en planta. <i>Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.</i>	20
2.13.	Gráfico Serrucho genérico.	22
3.1.	Representación de las variables del modelo	26
4.1.	Representación de las variables del modelo	30
5.1.	Gráfico Serrucho construido a partir del agendamiento proveniente de los datos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	35
6.1.	Gráfico Serrucho - Mineral Fase 1	46
6.2.	Gráfico Serrucho - Mineral Fase 2	47

6.3. Gráfico Serrucho - Estéril Fase 3	48
6.4. Gráfico Serrucho - Mineral Fase 4	49
6.5. Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio D	50
6.6. Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio E	51
6.7. Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio F	51
6.8. Plan de producción identificando origen de material- Ejercicio D	52
6.9. Plan de producción identificando origen de materia - Ejercicio E	52
6.10. Plan de producción identificando origen de materia - Ejercicio F	53
6.11. Gráfico Serrucho - Caso E	55
6.12. Gráfico Serrucho - Caso F	55
A.1. Curva de Costo de Operación en función de la capacidad del equipo	62
A.2. Curva de Costo Capital en función de la capacidad del equipo	63
B.1. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso A	64
B.2. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso B	65
B.3. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso C	65
B.4. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso D	66
B.5. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso E	66
B.6. Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso F	67
B.7. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso A	67
B.8. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso B	68
B.9. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso C	69
B.10. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso D	69
B.11. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso E	70
B.12. Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso F	70

Capítulo 1

Introducción

La planificación minera es el proceso en el cual se definen, entre otras cosas, los volúmenes de material que se extraerán en un momento determinado y con un destino determinado. La decisión sobre los movimientos de material es un proceso complejo que posee varias etapas las cuales están presentes desde los comienzos de un proyecto seleccionando los bloques a extraer en un modelo de bloques hasta el marcado del sector de extracción de un banco por parte de los topógrafos en el día a día de operación en una mina. Sin embargo, el momento en el cual se conceptualiza la extracción de material ocurre en etapas intermedias a las mencionadas.

Extraer la roca desde la mina no es lo mismo que extraer bloques en un modelo. Se deben considerar aspectos relacionados con los equipos mecánicos que se utilizarán para extraer el material del cerro y los equipos para trasladarlo desde el fondo de la mina hacia sus destinos. La decisión sobre *qué* equipos utilizar, *cuántos* comprar y *dónde* deben estar operando impacta fuertemente el valor del negocio minero. La creación y resolución de un modelo que logre responder a las tres preguntas mencionadas es lo que motiva este trabajo.

El plan de movimiento de material debe incluir también factores que representen la realidad, considerando las mantenciones realizadas a los equipos, junto con los factores operacionales relacionados con las personas que trabajan con ellos.

Una buena asignación de los equipos a su lugar de trabajo se ve reflejada no tan solo en el valor económico si no que también en la continuidad con que se logra alimentar la planta con mineral y en el cumplimiento de plan de producción. Esto último es un resultado que dependerá del momento en el cual se comienzan a explotar las distintas fases de la mina en función de los tonelajes remanentes en las fases anteriores.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Creación de una metodología para apoyar el desarrollo de un plan de asignación de equipos de carguío que permita el cumplimiento de un plan de producción.

1.1.2. Objetivos específicos

- Plantear y resolver el problema de asignación pala-banco que minimice los costos de inversión y operación.
- Identificar y medir diferencias entre la producción definida en el plan de mediano plazo a la obtenida considerando la asignación pala-banco óptimo, aplicando un caso que permita evaluar el desempeño del modelo con respecto a la metodología tradicional
- Realizar un análisis exploratorio de distintas aplicaciones potenciales del modelo creado.

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. El planteamiento del problema de optimización se realizará utilizando el lenguaje de programación Python, y se estudiará en primer lugar un año en particular de la vida del proyecto.

Los datos a utilizar contemplan las siguientes consideraciones:

- 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.

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 presentan los conceptos básicos de planificación minera en torno a la minería a cielo abierto presentando ideas sobre el diseño minero, la selección de equipos y las consideraciones de espacios para su operación. Al final de la sección se habla acerca de los gráficos serrucho y se presenta la programación lineal y un ejemplo de un problema de optimización.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para obtener los resultados de este trabajo.

En el Capítulo 4 se muestra el desarrollo del modelo de optimización junto con los supuestos y consideraciones que lo sustentan.

En el Capítulo 5 se muestra la obtención de los datos y desarrollo que se les dio para disponerlos de manera tal que el modelo los pudiera leer.

En el Capítulo 6 se presenta los resultados obtenidos por el modelo de optimización para distintos casos y consideraciones junto con el análisis de los datos obtenidos.

Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de este trabajo y las posibles extensiones para trabajos futuros.

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 junto a un modelo que fue útil para el desarrollo de este trabajo.

2.1. Planificación minera

La minería, según Newman y col. (2010), es el proceso de extracción de material naturalmente concentrado con el fin de obtener algún beneficio de ello acorde a los objetivos del dueño del negocio y a la restricciones físicas, geológicas y medioambientales que el yacimiento presente. 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 (Newman, et al., 2010). Es en la búsqueda de estas respuestas en donde el uso de modelos matemáticos y herramientas de optimización pueden ayudar a tomar la mejor decisión, y es en la búsqueda de estas respuestas en donde se centrará este trabajo.

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.

2.1.1. 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 según 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. Aquí 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.

2.1.2. Planificación tradicional en minería a cielo abierto

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 de un modelo de bloques. 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 segregarse 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.

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. Según Hustrulid, Kuchta y Martin (2013) los pasos para desarrollar la planificación y posterior diseño de las fases son los siguientes:

1. Decisiones y consideraciones preliminares:
 - La tasa máxima de extracción de mineral y estéril requerida para cada fase.
 - Las dimensiones de los equipo 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.

2.2. 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.

2.2.1. Carguío y Transporte

La importancia de este proceso productivo recae, según Le-Feaux (2008), en la magnitud de los costos que llevan asociados ya que son los más altos del negocio minero. Esto se debe a la gran cantidad de equipos involucrados, tanto para el carguío como el transporte, el alto grado de mecanización, menor rendimiento productivo por equipo y, sobre todo, a que es un proceso que se encuentra a lo largo de toda la vida de la mina.

El proceso cuenta con un objetivo que se puede resumir de la siguiente manera: *“Retirar el material tronado de la frente y transportarlo adecuadamente a su lugar de destino”*. Esto se puede lograr siguiendo la siguiente secuencia de actividades, Le-Feaux (2008):

1. Preparación de la zona de trabajo.
2. Posicionamiento de equipos.
3. Retirar el material tronado desde el frente de trabajo. (Carguío)
4. Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto a trasladarlo.
5. Transporte del material a su lugar de destino (Planta, acopio, botadero, entre otros).
6. Descarga del material.
7. Retorno del equipo de transporte al punto de carguío.

Lo anterior se repite hasta que se haya cumplido con extraer el material requerido en la frente.

Este proceso productivo es el más influyente en los costos de operación, como se ha mencionado, por lo que es de gran importancia su estudio para garantizar un ambiente de operación apto para alcanzar los mejores rendimientos de los equipos.

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, wheeldozers, 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 la siguiente sección.

2.2.2. 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.

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 28 a 46 (yd³). Su vida útil es de aproximadamente 7 años con un costo promedio de 7 millones de dólares, según Castro (2013). 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. 2.1

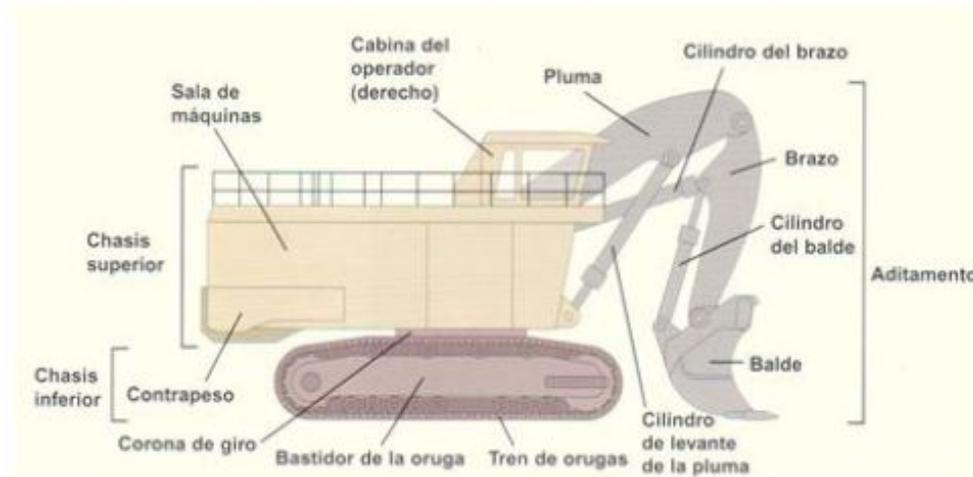


Figura 2.1: Componentes de una pala hidráulica. *Fuente: Castro (2013).*

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 aditamento. Su capacidad de carga va desde 33 a 93 . 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. 2.2

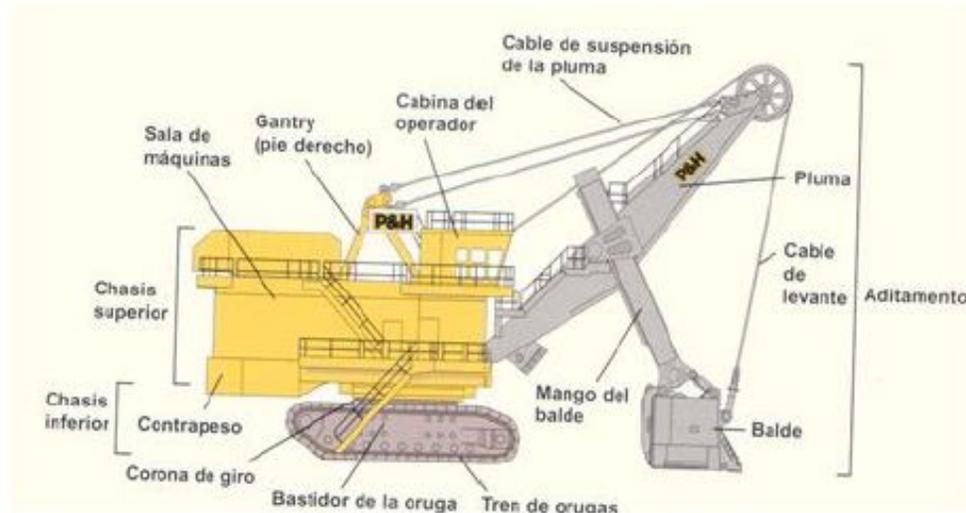


Figura 2.2: Componentes de una pala eléctrica. Fuente: Castro (2013).

El ciclo de trabajo de una pala eléctrica cuenta con las siguientes fases, según 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.

2.2.3. 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 según Bozorgebrahimi. E. Hall (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 2.3 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.

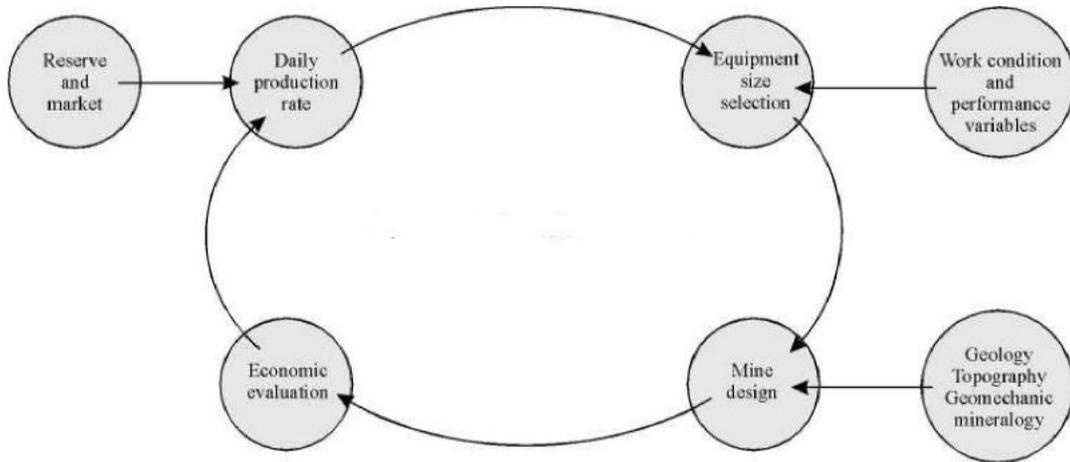


Figura 2.3: Ciclo de selección de tamaños de equipos *Fuente: Bozorgebrahimi. E. Hall (2003).*

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.

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. 2.4 para determinar el tipo de equipo.

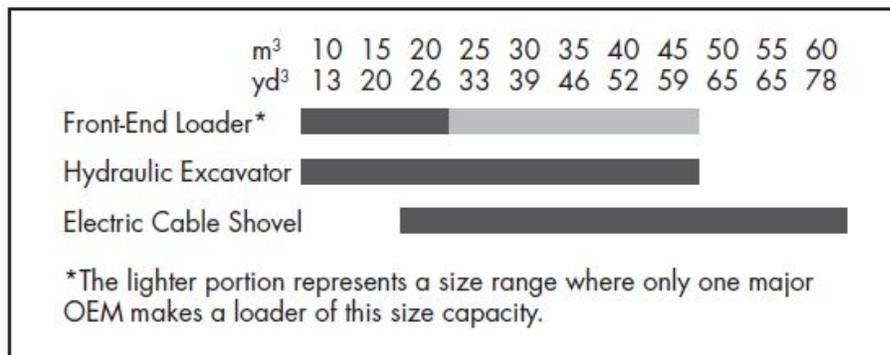


Figura 2.4: Tipo de equipo en función del tamaño de balde. *Fuente: Darling (2013).*

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.

Factor de llenado

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

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.

Disponibilidad Mecánica

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

2.3. 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, comenzando desde conceptos básicos aportados por Hustrulid, Kuchta y Martin (2013), para luego comentar sobre las expansiones realizadas en los pits a medida que se extraen las distintas fases.

2.3.1. Geometría Básica de Bancos

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.

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.

La minería a cielo abierto es altamente mecanizada, por lo que cada equipo debe contar con un espacio de trabajo que le permita operar eficientemente. 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 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. 2.5

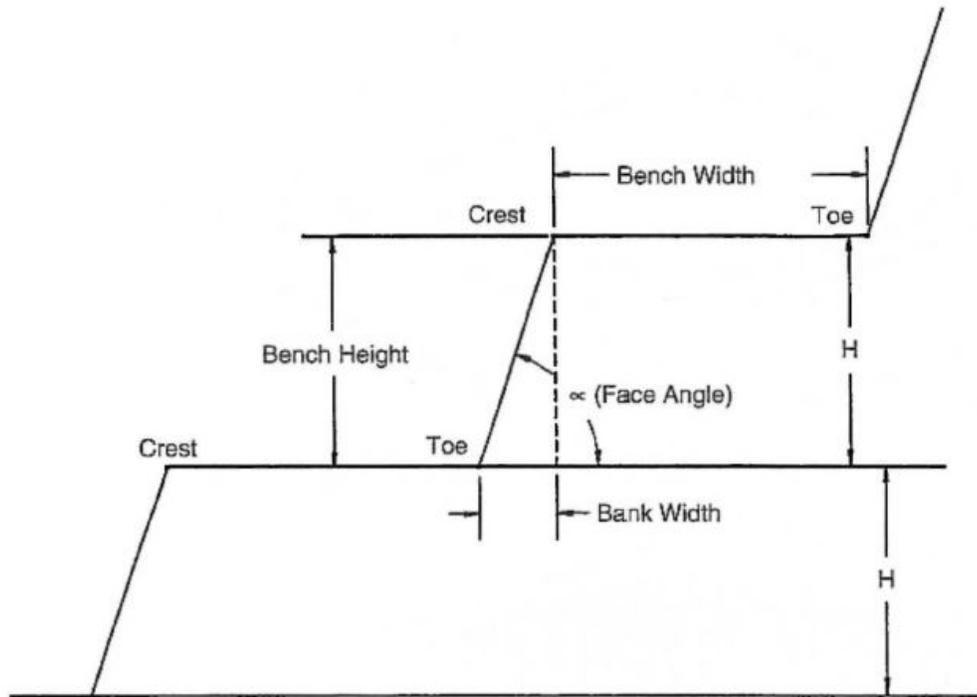


Figura 2.5: Componentes básicos de un banco. Vista de perfil. Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.

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 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 un pala se muestra en la Fig 2.6

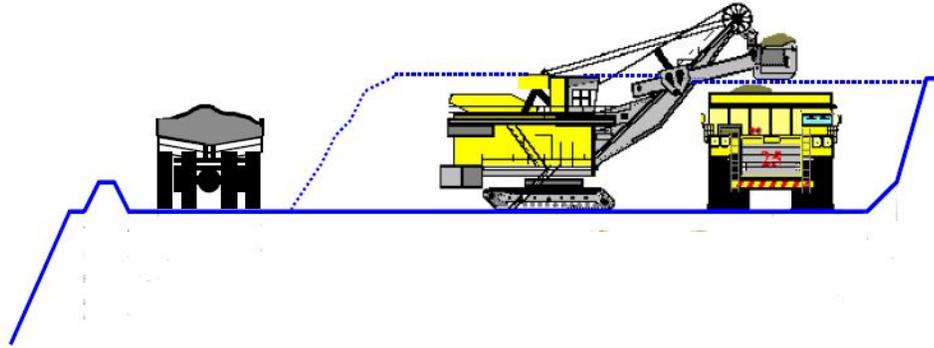


Figura 2.6: Banco de trabajo con equipos operando, la pala se encuentra cargando un camión acuatado mientras un camión ya cargado se dirige a su destino. Vista de perfil. *Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.*

2.3.2. Acceso al Mineral

Antes de comenzar con la producción mayor en un banco, se debe establecer un frente vertical de excavación, más aún, se debe contar con una rampa que permita el acceso del cargador y del camión.

El ancho mínimo del sector de carguío depende del equipo que se esté utilizando y de la configuración que se esté escogida:

- La pala se mueve entre los dos frentes de carguío, Fig. 2.7 dejando espacio para un solo camión acuatado.

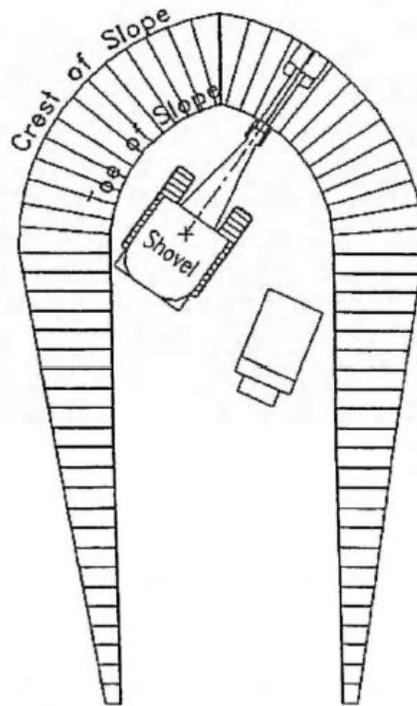


Figura 2.7: Trabajo en rampa de acceso, la pala se encuentra cargando un camión. Vista en planta. Fuente: *Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013*.

- La pala se ubica en el centro y extrae de ambos frentes, Fig. 2.8 permitiendo dos camiones acuatados.

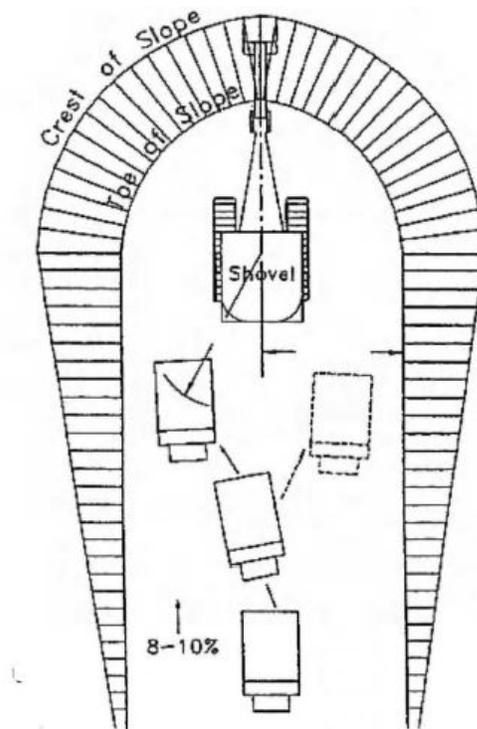


Figura 2.8: Trabajo en rampa de acceso con dos camiones, mientras uno de los camiones está siendo cargado por la pala el otro se aculata en el costado libre al lado de la pala. Vista en planta. Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.

2.3.3. Proceso de Expansión

Cuando la rampa de acceso alcanza la cota adecuada, el corte se debe expandir de manera lateral. Este proceso se ve en la Fig. 2.9. Inicialmente se cuenta con un espacio operacional bastante limitado. Los camiones tienen que girar y aculatar en la parte superior de la rampa para luego bajar por ella retrocediendo hacia el cargador. Cuando el sector de trabajo se expande lo suficiente, el camión puede ingresar y maniobrar. Luego, cuando ya se cuenta con una mayor área de trabajo, se pueden ingresar más palas para que trabajen de forma simultánea.

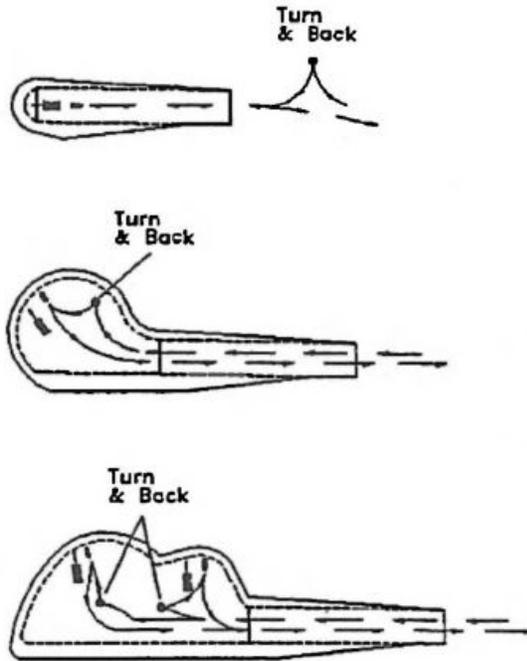


Figura 2.9: Evolución de banco de trabajo: en la primera etapa el camión se detiene y aculata antes de entrar a la rampa; en la segunda, el camión entra y se aculata dentro del banco de trabajo; en la tercera ya se tienen dos palas en operación con sus respectivos camiones siendo cargados. Vista en planta. *Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.*

Existen tres formas distintas de expandir los límites del banco:

1. Corte Frontal:

La pala se encuentra frente a la cara del banco y comienza a excavar hacia delante y a los costados. De esta forma, se permiten dos puntos de carguío de camiones. El ángulo de giro del brazo de la pala va desde un máximo de 110 grados a un mínimo de 10 grados, mientras que el ángulo que permite una operación eficiente es cercano a los 60°. Una vez que la pala penetra hasta el centro del equipo, este se mueve de manera paralela a la cara del banco para iniciar un nuevo corte frontal, Fig. 2.10.

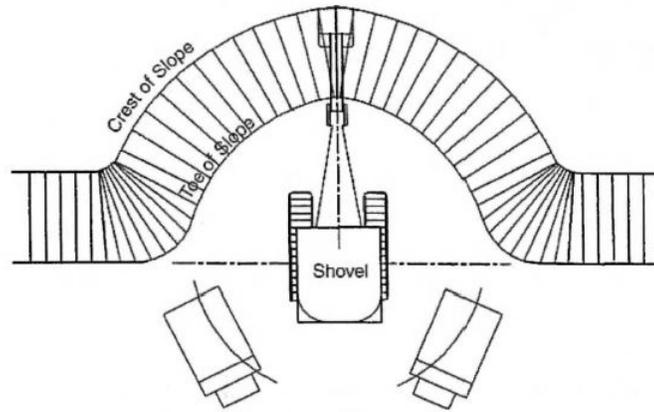


Figura 2.10: Pala trabajando según el método de corte frontal. Vista en planta. *Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.*

Cuando la cara y el ancho del banco son lo suficientemente grandes, más de una pala puede trabajar en la misma cara. Desde el punto de vista de las palas es un método altamente eficiente de operación, sin embargo, los camiones deben detenerse y realizar maniobras en reversa.

2. Corte *Drive-by*

Cuando la geometría de la mina lo permite, se puede implementar esta variante. La pala se mueve a través y de forma paralela a la cara de excavación. Para este caso se requiere que el banco presente acceso para los camiones en ambas direcciones, por lo que requiere más espacio operacional. En términos de los equipos, es altamente eficiente para las palas y los camiones dado que los camiones no tienen que maniobrar para llegar al punto de carga, Fig. 2.11.

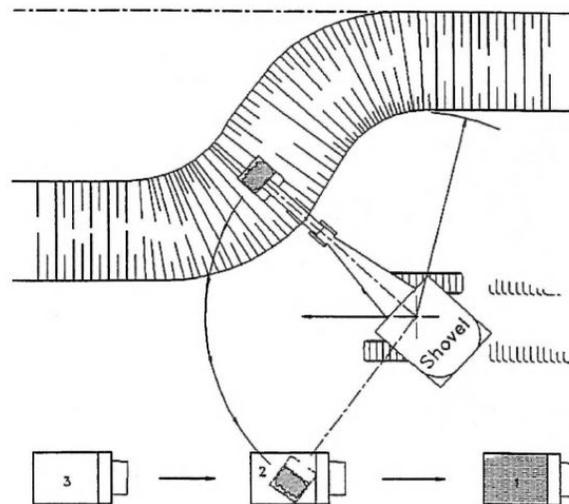


Figura 2.11: Pala trabajando según el método *Drive-by*. Vista en planta. *Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.*

3. Corte Paralelo:

Los cortes paralelos se realizan cuando las limitaciones espaciales permiten que exista solo un acceso desde la rampa hacia la pala. Esto implica que el camión debe ingresar al banco, detenerse, girar y retroceder para ubicarse en el punto de carguío. A medida que se va abriendo área, puede darse el espacio para dos puntos de carguío de camiones, Fig. 2.12.

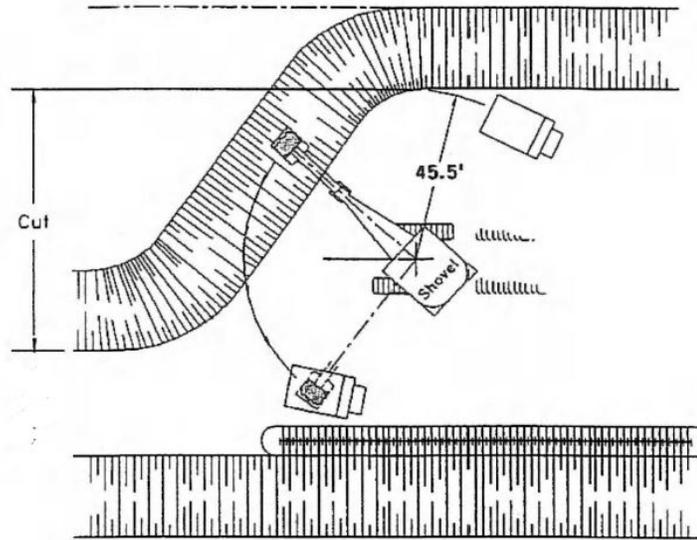


Figura 2.12: Pala trabajando según el método de cortes paralelos. Vista en planta. Fuente: Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013.

2.3.4. Espacio mínimo de operación

En este caso, se estudiará el espacio mínimo de operación para la realización de cortes paralelos. La dimensión que se debe dimensionar es el ancho del banco de trabajo. El banco de trabajo corresponde al que está siendo minado. El ancho se considera como la distancia entre la cresta del banco que sirve como piso para las operaciones de carguío y la pata del banco que se está creando. Los parámetros que influyen en el ancho mínimo van desde las dimensiones de los equipos hasta el número de puntos de carguío de camiones que se utilizarán.

La metodología para el dimensionamiento del banco de trabajo se presenta a continuación

- *Paso 1:* Se debe determinar la berma de seguridad que irá a lo largo del banco. La altura de la berma debe ser del orden del radio de la rueda de los camiones. Luego, de acuerdo al ángulo de reposo del material, se determina el ancho de la berma (T_c).
- *Paso 2:* La distancia desde la berma a la línea central del camión (B) es determinada asumiendo que el camión va en paralelo a la berma. Se utiliza en general una medida estándar de 5 pies desde la berma a la rueda del camión, por lo que la distancia desde la berma a la línea central deberá incluir la mitad del ancho del camión.
- *Paso 3:* Para incluir las dimensiones de la pala se considera la distancia entre el centro de la pala hasta el centro del camión. Esta dimensión es considerada el radio de descarga.

La otra dimensión que se debe incluir es la distancia máxima desde la línea central de la pala hacia la pata del banco. (G).

- *Paso 4*: El ancho del banco de trabajo (W_B) queda determinado por la ecuación (2.3)

$$W_B = T_c + B + G \quad (2.3)$$

De lo anterior se desprende entonces que los equipos seleccionados para la operación de carguío influirán no tan solo en el ritmo de producción obtenido o en los costos de operación, sino que también en el diseño de la misma operación.

2.4. 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 de acuerdo al trabajo realizado por 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. 2.13

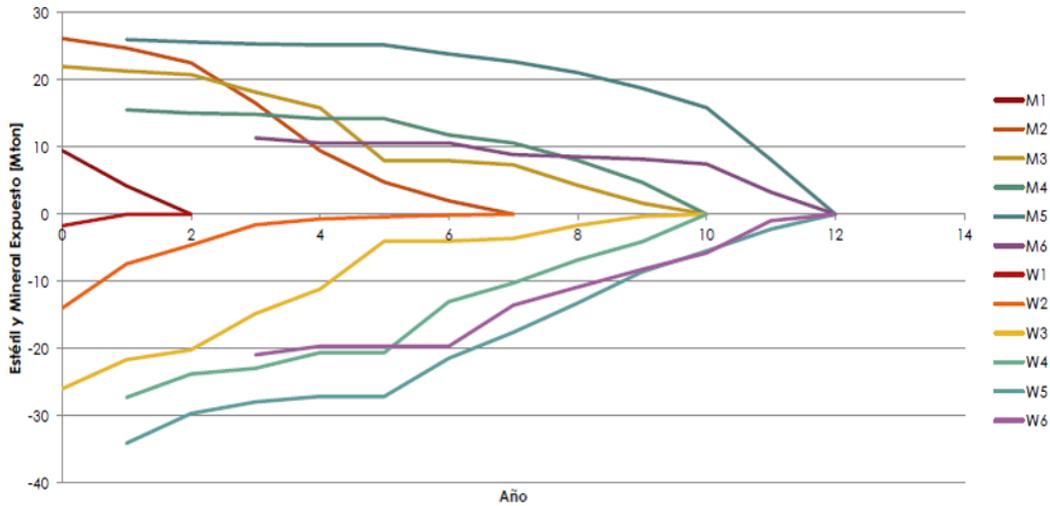


Figura 2.13: Gráfico Serrucho genérico.

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.

2.5. 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, de acuerdo a Valdez (2011). 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.

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

- **Variabes:** 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 (2.4):

$$\begin{aligned} \max \quad & Z = c^T x \\ \text{s.a.} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{2.4}$$

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.

2.5.1. Programación Lineal aplicada 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. El problema consiste en determinar el tamaño y el tipo de flota a utilizar lo cual es determinado por las características geológicas de la mina y de la capacidad de los equipos. Los problemas operacionales relacionados con la localización de los equipos en el espacio se aterriza en el desarrollo de estrategias de despacho y secuenciamiento. Estas decisiones están basada por lo general en las rutas de acarreo y a las limitaciones de los equipos. Para este fin, se han desarrollado modelos estocásticos y determinístico Newman y col. (2010).

Muchos modelos de selección de equipos y de rutas usan optimización o programación lineal para determinar las flotas y la ubicación en la cual operan. A continuación se comentarán algunos de los trabajos mas interesantes realizados con respecto al tema, para mayor información se puede consultar en Newman y col. (2010).

Weintraub (1987) utilizó la estructura de redes para el desarrollo de programación lineal basada en heurística para 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 and 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 (1989) también resolvió un modelo por partes. En resumen, buscaba maximizar la productividad de camiones y palas mientras cumplía los requerimientos de demanda. Primero determinaba la localización de las palas para luego utilizar modelos de redes para establecer el plan óptimo de producción (considerando tiempos de espera). Finalmente resolvía un modelo de asignamiento en tiempo real para despachar los camiones en la mina.

Naoum (2000) desarrolló 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 mantención 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 (2006) usa 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 %.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada en esta memoria con el fin de obtener los resultados mostrados en el Capítulo 6

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. Exploración de aplicaciones

Una vez obtenidos los resultados de las etapas anteriores se procederá a realizar distintas pruebas en torno a las posibles aplicaciones del modelo, dentro de las que se destaca la decisión de compra de los equipos a utilizar, restricciones de espacio e inclusión de ingresos, entre otros.

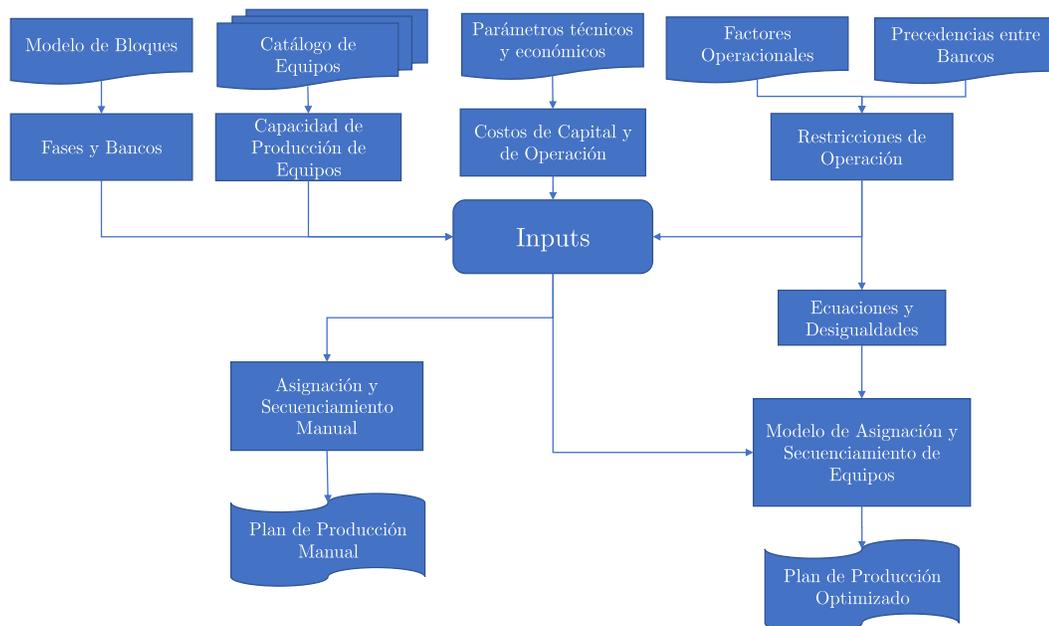


Figura 3.1: Representación de las variables del modelo

Capítulo 4

Desarrollo de Modelo de Optimización

En este capítulo se muestra la formulación del modelo de optimización de asignación de equipos de carguío a los bancos. En primer lugar se darán a conocer los supuestos bajo los cuales opera el modelo y como estos son incorporados en las restricciones y en la función objetivo.

4.1. Consideraciones

Dentro de la dinámica en la cual operan los equipos de carguío en una operación minera se pueden considerar numerosos factores que afectan la productividad: interferencias de operaciones, fallas de equipos, la habilidad con la cual los operadores se desempeñan, entre otros. Por lo que si un modelo busca anticipar y predecir la producción debe incluir las variables más significativas de la operación.

En este caso, los factores que se consideran en el modelo son los siguientes:

- **Disponibilidad Mecánica:** fracción de tiempo en la que cada equipo se encuentra en condición de ser operado. Se puede ingresar para cada equipo específicamente.
- **Factores Operacionales:** fracción de tiempo en la cual el equipo puede ser operado de acuerdo a las condiciones del sector de trabajo. Está asociado a cada banco de trabajo.
- **Factor de llenado:** pondera la capacidad nominal del equipo de carguío, ajustando la capacidad que efectivamente puede extraer. Este factor se ingresa de acuerdo a las características de cada equipo.
- **Espacio disponible de operación:** cada banco cuenta con un área inicial de operación la cual se va incrementando a medida que se va extrayendo el material del sector.
- **Precedencias entre bancos de la misma y distintas fases:** restringe la secuencia de extracción de los bancos, se ingresa al modelo como parámetro.
- **Requerimientos de alimentación a la planta de procesamiento:** es la restricción que permite controlar la alimentación a la planta.
- **Metas de producción:** como se está trabajando con un año de producción deter-

minado, todo el material agendado para ese año debe extraerse en el resultado del modelo.

Se considerará como sectores de producción los bancos de las distintas fases a los cuales se les asignará los equipos de carguío para extraer el material. En este sentido, el material a extraer por cada banco está determinado de acuerdo a la cubicación del modelo de bloques y la decisión sobre qué es mineral y qué es estéril viene ya determinada en los datos obtenidos.

El mineral se expresa como una fracción del tonelaje total de cada banco, por lo que a medida que se va extrayendo material, este se pondera para determinar la cantidad de mineral y estéril que se extrae en cada periodo.

El cálculo del área disponible para cada periodo se determina considerando el tonelaje extraído, la altura de banco y la densidad del material. De ésta manera se obtienen los metros cuadrados disponibles para la operación.

Todas estas consideraciones fueron determinadas en vista del objetivo del modelo a desarrollar, el cual consiste en obtener una asignación de equipos de carguío a los distintos bancos de una mina en operación que minimice los costos asociados a la compra y/o utilización de los equipos. Es importante recalcar lo anterior, dado que el modelo aspira a decidir la compra de equipos y su asignación (para el caso de proyectos greenfield) como también distribuir equipos que ya se encuentren adquiridos (para el caso de proyectos en operación que ya cuenten con una flota definida). El modelo no considera la opción de reemplazo de equipos.

4.1.1. Variables

Dentro de las variables que se utilizarán en el modelo de optimización se encuentran tanto variables continuas como binarias, la primera es la que se utiliza como la variable de decisión del modelo e indica la producción mientras que las binarias son las que van controlando la secuencia extracción de material.

Las variables utilizadas son las siguientes:

$$x_{pbft} = \text{porcentaje de tiempo } t \text{ que la pala } p \text{ está en el banco } b \text{ de la fase } f \quad (4.1)$$

$$\bar{x}_{pbft} = \begin{cases} 1, & \text{si la pala } p \text{ está en el banco } b \text{ de la fase } f \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$z_{bft} = \begin{cases} 1, & \text{si el banco } b \text{ de la fase } f \text{ está activa en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\bar{z}_{bft} = \begin{cases} 1, & \text{si el banco } b \text{ de la fase } f \text{ terminó de extraerse en el periodo } t \text{ o posterior} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$w_{pt} = \begin{cases} 1, & \text{si compro la pala } p \text{ en el periodo } t \text{ o antes} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\bar{w}_{pft} = \begin{cases} 1, & \text{si la pala } p \text{ está asignada a la fase } f \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.6)$$

Como se puede notar en la ecuación (4.1) la variable de decisión es una fracción de tiempo relacionada con la duración del periodo en cuestión. Lo que se busca es que la producción de una pala en particular quede definida por su productividad, medida en toneladas por hora, la duración del periodo y la fracción de periodo que se encuentre trabajando en el sector.

Para que sea posible extraer el mineral desde un banco, es necesario que la pala esté presente en el sector, por lo cual se hace necesaria la creación de la variable mostrada en la ecuación (4.2). La condición de asignación de equipos de carguío al sector depende de si el banco está activo o no, lo cual es controlado por la variable presente en la ecuación (4.3).

El control de las precedencias se realiza de manera conjugada entre las variables de las ecuaciones (4.3) y (4.4). A medida que los bancos sean dados por finalizados se procede a dar permiso para trabajar a los siguientes.

Como lo que se está controlando es la asignación de equipos, es importante contar con los equipos para que produzcan. En este sentido la variable en la ecuación (4.5) controla que solo las palas compradas puedan incorporarse a la producción.

Por último, durante la construcción del modelo surgió la necesidad de controlar la cantidad de fases a las cuales eran asignados los equipos de carguío en un mismo periodo, de manera que se creó la variable presente en la ecuación (4.6) para lograrlo.

4.1.2. Parámetros

Los parámetros y factores que son parte del modelo son los siguientes:

- SG = densidad de la roca.
- AB = altura de banco.
- T_t = duración en horas de cada periodo t .
- P = conjunto de equipos de carguío.
- F = conjunto de fases.
- B_f = conjunto de bancos asociados a cada fase.
- C_p = costo por tonelada extraída por equipo p .
- A_{bf} = área disponible del banco b de la fase f .
- AO_p = área que ocupa el equipo p .
- Q_p = toneladas por hora que el equipo p puede mover.
- K_p = inversión en USD para equipo p .
- γ_{bf} = total de material a mover del banco b de la fase f .
- Min_{bf} = fracción de mineral del banco b de la fase f . Se refiere a cuanto mineral hay en cada banco por tonelada total extraída.

- $MinPlanta_t$ = requerimiento de planta por periodo.
- D_p = disponibilidad mecánica del equipo.
- H = holgura de movimiento de material. Permite ponderar el γ_{bf} para la realización de pruebas con el modelo.
- HP = holgura de envío de material a planta. Permite ponderar el $MinPlanta_t$ para la realización de pruebas con el modelo.
- Fl_p = factor de llenado de la pala. p
- FD = factor de descuento, corresponde a $1/(1+r)$ con r la tasa de descuento.
- FO_{bf} = factor operacional.
- $MaxPala_p$ = máximo numero de fases en las cuales puede operar un mismo equipo en cada periodo.
- $MaxLead_{ff'}$ = Maxlead entre la fase f y f' . Representan el desfase máximo que puede haber entre un banco de la fase f y otro de la fase f' .
- $MinLead_{ff'}$ = Minlead entre la fase f y f' . Representan el desfase mínimo que puede haber entre un banco de la fase f y otro de la fase f' .

Se puede notar que se incorporan factores para hacer más flexible el modelo en relación a los movimientos de material a realizar, la idea es facilitar la construcción y prueba del modelo variando los límites de manera fácil durante la etapa de pruebas.

4.1.3. Ejemplo de funcionamiento

A continuación se ilustrará con un ejemplo sencillo el funcionamiento de las variables y parámetros mencionados en la sección anterior.

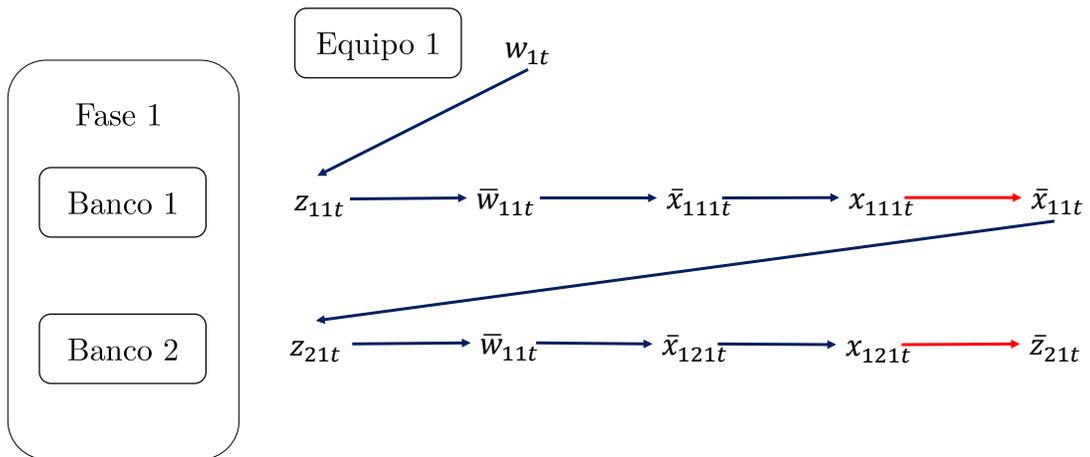


Figura 4.1: Representación de las variables del modelo

En la Fig. 4.1 se muestra la precedencia entre las variables asociadas a un equipo de carguío y las pertenecientes a un banco. En rojo se muestran las variables continuas y en azul las variables enteras. Entrando a mayor detalle la variable w_{1t} es la que indica que el Equipo 1 se encuentra en la flota de equipos y puede ser asignado a un sector de trabajo. La producción es controlada por la variable x_{pbft} , pero para que pueda tomar un valor es necesario que se activen las variables precedentes a ella. En primer lugar se activa la variable z_{bft} , que al pertenecer al primer banco de una fase no tiene restricción de precedencia en este caso, la cual indica que el Banco 1 de la Fase 1 se encuentra activo. A continuación la variable \bar{w}_{pft} indica que el Equipo 1 está trabajando en la Fase 1 y la variable \bar{x}_{pbft} indica que el Equipo 1 está trabajando en el Banco 1 de la Fase 1, de esta manera se tiene más control sobre las asignaciones de los equipos.

Una vez que se determina que el Equipo 1 se encuentra en el Banco 1 de la Fase 1 listo para operar la variable x_{pbft} puede comenzar a aumentar su valor. La producción obtenida con el incremento de esta variable queda determinada por la siguiente expresión:

$$Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot x_{pbft} = \text{Ton Extraído} \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 indica que el tonelaje extraído es resultado de la ponderación entre la capacidad del equipo, la duración del periodo, la fracción de tiempo que el equipo está asignado a ese sector y los factores operacionales correspondientes. Cuando este valor es igual al tonelaje total del banco en cuestión la variable \bar{z}_{bft} toma el valor de 1 y le da permiso a la variable z_{bft} del siguiente banco para entrar a funcionar.

4.2. Formulación del Problema

Basado en las ecuaciones y comentarios de las secciones anteriores se plantearán dos problemas, uno de minimización de costos y otro de maximización de ganancias.

La siguiente ecuación muestra la función objetivo que busca minimizar los costos totales.

$$\min: \sum_t K_p \cdot w_{pt} \cdot FD_t + \sum_p \sum_t \sum_f \sum_b C_p \cdot x_{pbft} \cdot Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot FD_t \quad (4.8)$$

A continuación se mostrará la función objetivo modificada para incluir este ingreso dentro del problema, el cual será utilizado para estudiar el funcionamiento del modelo.

La función objetivo queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\max: & - \sum_t K_p \cdot w_{pt} \cdot FD_t - \sum_p \sum_t \sum_f \sum_b C_p \cdot x_{pbft} \cdot Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot FD_t \\
& + \sum_p \sum_t \sum_f \sum_b NSR_{bf} \cdot x_{pbft} \cdot Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot FD_t \quad (4.9)
\end{aligned}$$

El NSR_{bf} mostrado en la ecuación (4.9) representa el monto en USD que se gana por tonelada de material extraído.

Este valor es obtenido mediante la valorización de cada bloque del modelo en función de sus leyes de oro y cobre, considerando los costos asociados al transporte y a la venta y refinación del producto final. El NSR viene como valor ya calculado dentro de los datos entregados.

Ambas funciones objetivos están sujetas a las siguientes restricciones:

$$\sum_b \sum_f x_{pbft} \leq 1 \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_p \sum_t Q_p \cdot T_t \cdot x_{pbft} \geq H \cdot \gamma_{bf} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f \quad (4.11)$$

$$x_{pbft} \leq w_{pt} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.12)$$

$$w_{pt} \geq w_{p(t-1)} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.13)$$

$$\bar{z}_{bft} \leq \frac{\sum_b \sum_{t' \leq t} \sum_p Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot x_{pbft}}{\gamma_{fb}} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T \quad (4.14)$$

$$\bar{z}_{bft} \geq \bar{z}_{bf(t-1)} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T \quad (4.15)$$

$$z_{bft} \leq \bar{z}_{(b-1)ft} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.16)$$

$$x_{pbft} \leq z_{bft} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.17)$$

$$x_{pbft} \leq \bar{x}_{pbft} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.18)$$

$$\bar{x}_{pbft} + \bar{z}_{bf(t-1)} \leq 1 \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.19)$$

$$\sum_p \bar{x}_{pbft} \cdot AO_p \leq A_{bf} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, t = 1 \quad (4.20)$$

$$\sum_p \bar{x}_{pbft} \cdot AO_p \leq \frac{\sum_p \sum_{t' \leq t} Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot x_{pbft}}{AB \cdot SG} + A_{bf} \quad \forall f \in F, \forall b \in B_f, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.21)$$

$$\sum_p \sum_f \sum_b \sum_t Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot Min_{bf} \cdot x_{pbft} \leq MinPlanta \cdot HP \quad \forall t \in T \quad (4.22)$$

$$\bar{w}_{pft} \geq x_{p,f,b,t} \quad \forall f \in F, \forall b \in B, \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.23)$$

$$\sum_f \bar{w}_{pft} \leq MaxPala \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (4.24)$$

$$z_{bft} \geq \bar{z}_{(b'-Maxlead_{ff'})f't} \quad \forall b \in B_f, \forall b' \in B_{f'}, \forall t \in T \quad (4.25)$$

$$z_{bft} \leq \bar{z}_{(b'-Minlead_{ff'})f't} \quad \forall b \in B_f, \forall b' \in B_{f'}, \forall t \in T \quad (4.26)$$

La función objetivo del modelo (4.8) busca minimizar los costos asociados a la adquisición de equipos de carguío y el costo operacional en función del tonelaje extraído. El tonelaje extraído en cada periodo T queda expresado por la multiplicación de la capacidad por hora del equipo por los factores operacionales correspondientes, la fracción del periodo que está el equipo operando y la duración del periodo.

La ecuación (4.10) dice que el porcentaje de tiempo asignada no puede superar el 100 %. La restricción (4.11) indica que todo el material indicado debe ser extraído dentro de la holgura. La ecuación (4.12) indica que solo se puede asignar tiempos de trabajo de equipos cuando el equipo esté comprado y la desigualdad (4.13) indica que una vez que el equipo está comprado se mantiene en ese estado. La ecuación (4.14) condiciona que para dar por finalizada la extracción de un banco se debe haber extraído todo el tonelaje del banco, mientras que la desigualdad (4.15) dice que si ya se dio por finalizado un sector este sigue así. La restricción (4.16) indica las precedencias entre bancos de una misma fase, para poder trabajar en un banco, marcarlo como banco activo, el anterior debe estar listo. La desigualdad (4.17) indica que para poder asignar tiempo de trabajo en un banco este debe estar activo. La ecuación (4.18) indica que para poder asignar tiempo de trabajo debe haber algún equipo asignado al sector. La restricción (4.19) indica que cuando un banco está dado por terminado ya no puede tener equipos asignados. La ecuación (4.20) indica que se puede asignar equipos de carguío a los bancos que posean el espacio disponible para el trabajo la ecuación (4.21) va actualizando el área disponible en función del tonelaje extraído en los periodos anteriores. La restricción (4.22) regula los tonelajes enviados a planta. La desigualdad (4.23) indica que para poder asignar tiempo de trabajo de una pala en un banco debe estar asignado el equipo a esa fase y la ecuación (4.24) regula la cantidad de fases en la cual puede trabajar un equipo en el mismo periodo. Por último, las ecuaciones (4.25) y (4.26) regulan las precedencias entre bancos de fases distintas.

Capítulo 5

Exploración y obtención de datos

En este capítulo se dará a conocer la exploración del modelo de bloques así como la construcción del gráfico serrucho de la mina. Por otro lado, también se mostrarán los inputs a utilizar en el modelo obtenidos a partir de los catálogos de equipos de carguío y transporte.

5.1. Modelo de bloques

El modelo de bloques con el que se trabajó pertenece a un proyecto real, por lo que para facilitar su manejo solo fueron considerados los bloques que son parte del plan de producción.

Dentro de las columnas del modelo se encuentran diversas variables dentro de las cuales destacan:

- **Coordenada "Z":** indica la cota a la cual se encuentra el centro del bloque. Esta cota será utilizada para identificar los bancos del rajo.
- **Dimensión Vertical "Z":** corresponde a la dimensión vertical de cada bloque. Se consideró esta dimensión como la altura de banco
- **Periodo:** sus valores van desde el 0 hasta el 17. Corresponden en los cuales se extrae cada bloque, siendo 0 el primer año y 17 el último.
- **Fases:** indica a que fase corresponde cada bloque.
- **Destino:** indica hacia donde es llevado el bloque luego de su extracción. De los 5 destinos originales del modelo, los cuales incluyen botadero, planta y stocks, se identificó los bloques entre mineral y estéril con el objetivo de simplificar el ejercicio. Si bien el modelo no considera diferentes destinos al momento de decidir la extracción de material desde los bancos se considera importante poseer alguna clasificación de la roca extraída con el fin de controlar la producción, de esta manera se puede observar que sucede con la alimentación a la planta.

5.1.1. Gráfico Serrucho

Como se mencionó en la sección anterior de cada bloque se posee el año en el cual se extrae, el destino al cual se llevará el bloque posterior a su extracción y la fase a la cual pertenece el bloque. De esta manera, basta con ordenar y clasificar los bloques para obtener el gráfico de agotamiento de mineral de la mina, el cual se ve en la Fig. 5.1

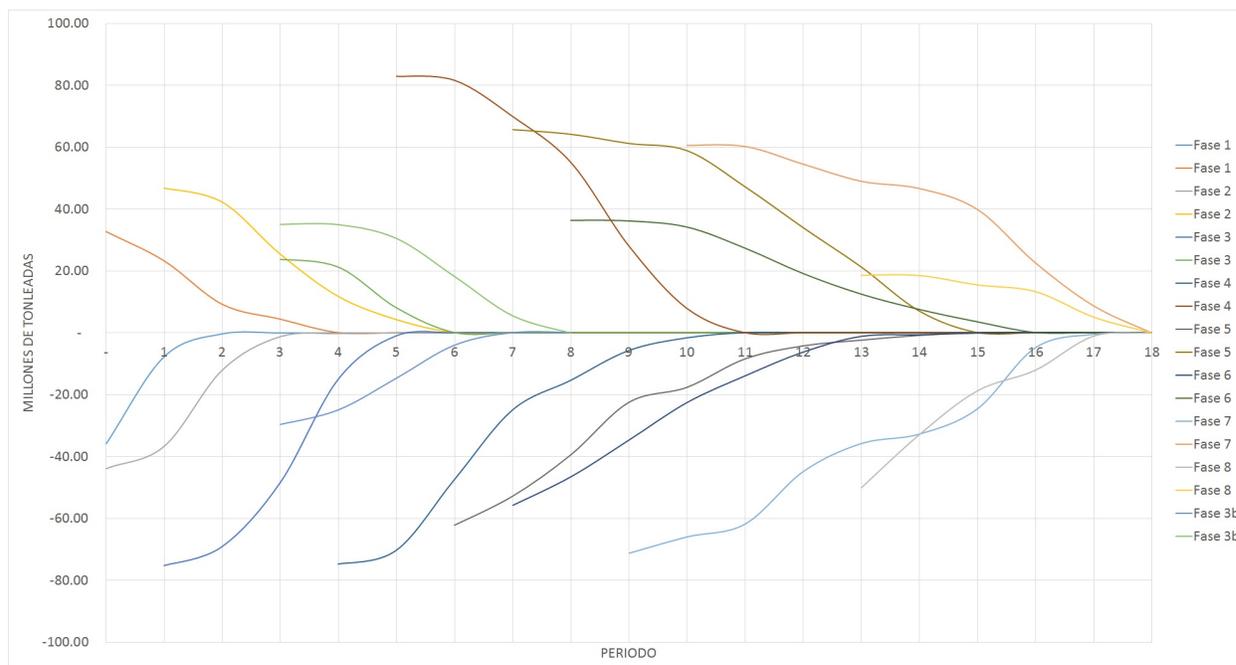


Figura 5.1: Gráfico Serrucho construido a partir del agendamiento proveniente de los datos.
Fuente: Elaboración propia.

A partir del gráfico anterior se escoge un año en particular con el cual se va a trabajar. En este caso se escoge el periodo 4 por las siguientes razones:

1. Al ser un año cercano al comienzo de las operaciones los supuestos en torno a la disponibilidad mecánica de los equipos son válidos de acuerdo a lo mencionado en la sección 2.2.3.
2. A pesar de encontrarse al comienzo de la vida de la mina, ya se cuenta con 4 fases en operación (3 trabajando en mineral y una en estéril), por lo que se cuenta con suficientes sectores de trabajo para la asignación de equipos.
3. Al no tratarse de grandes movimientos de toneladas, resulta más fácil ir probando las variables y restricciones del modelo.

5.1.2. Material a Mover

Una vez escogido el año 4 para ser utilizado se procede a exponer de manera ordenada el material a mover. En la tabla 5.1 se puede apreciar cada banco extraído en el año 4 con el

Tabla 5.1: Material a mover - Año 4

Fases	Banco	Tonelaje Total	Toneladas de Mineral	NSR [USD/ton]
2	14	2,109,879	2,052,701	5,637
2	15	1,986,257	1,928,656	6,336
2	16	1,876,662	1,826,367	7,427
2	17	1,728,332	1,692,210	8,445
3	9	5,989,359	1,727,331	14,232
3	10	6,184,217	2,507,700	9,500
3	11	5,833,727	2,949,532	7,731
3	12	4,882,407	2,928,956	6,209
3	13	4,253,745	3,035,047	4,591
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	209,091	2,469
3b	8	2,505,574	342,763	1,845
3b	9	2,896,096	819,306	927
3b	10	3,323,287	1,321,671	358
3b	11	3,746,793	1,781,975	97

tonelaje correspondiente y la fase a la que corresponde.

La otra particularidad mencionada de este periodo es que se cuenta con una fase de la cual solo se extrae estéril, lo cual se espera que influya de alguna manera en el resultado de asignación de equipos.

5.2. Equipos de carguío

La recopilación de información acerca de los equipos de carguío se realizó en catálogos de CAT con el objetivo de obtener información en relación a las dimensiones de los equipos, sus costos de operación y adquisición y su producción estimada. Esta información será tomada y utilizada por el modelo para la determinación de la asignación óptima, así como también para la asignación manual de los equipos.

La información relacionada con los costos de adquisición y de operación fue considerada de acuerdo a los datos de CostMine (2007) para luego ser actualizados al valor de hoy.

Realizando un emparejamiento entre los datos provenientes de los catálogos de equipos de CAT y los de CostMine (2007) se obtuvo la tabla 5.2

Los valores de la tabla que se encuentran en cursiva fueron estimados de acuerdo al gráfico

Tabla 5.2: Parámetros de Equipos de Carguío

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

mostrado en Anexos A.1 mientras que los valores subrayados se completaron usando el gráfico en Anexos A.2.

Dada la forma en la cual se construyó el modelo es necesario expresar el costo operacional del equipo en USD/hora. Para lograr esto, se considerarán los siguientes supuestos:

- La flota de camiones permite que las palas se encuentren saturadas.
- Cada camión se llenará con tres baldadas de la pala que lo cargue.

El primer supuesto se realiza con el objetivo de poder expresar la productividad de la pala en relación a ella misma sin depender del ciclo de los equipos de transporte mientras que el segundo se realiza para expresar la productividad directamente de la capacidad de balde de cada pala. Este último supuesto es bastante fuerte y funciona bien cuando las palas escogidas para la producción no difieren tanto en tamaño, pero para el caso de que se presente una diferencia considerable el supuesto implica que la flota de camiones debe ser distinta para que se cumpla la condición de carguío.

Considerando los supuestos y la ecuación (2.2) se puede determinar el ritmo de producción de cada pala, quedando como se muestra en la tabla 5.3.

En relación a las dimensiones de operación de los equipos de carguío, estas fueron determinadas utilizando la ecuación (2.3) quedando como se muestra en la Tabla 5.4.

Se utilizaron los supuestos mencionados para incluir las dimensiones de los camiones, cuyos valores se encuentran en la tabla A.1 .

Es importante recordar en este punto que dentro de los objetivos de la memoria no se encuentra el desarrollo de un modelo de costos para la operación ni el diseño de fases de

Tabla 5.3: Producción de equipos de carguío

Pala	Velocidad de giro [rpm]	Tiempo 3 Baldadas [min]	Camiones por hora	Producción [ton/hora]	Costo [USD/ton]
P01	5.1	1.50	39.87	1,683	\$0.06
P02	4.9	1.52	39.51	1,903	\$0.09
P03	4.7	1.53	39.12	2,351	\$0.08
P04	4.9	1.52	39.51	2,845	\$0.08
P05	4.6	1.54	38.92	3,749	\$0.10
P06	4.7	1.53	39.12	5,169	\$0.08
P07	3.8	1.62	37.02	5,774	\$0.09
P08	3.8	1.62	37.02	7,473	\$0.08
P09	3.9	1.61	37.29	11,632	\$0.10
P10	1.2	3.15	19.02	2,618	\$0.08
P11	1.2	3.15	19.02	3,665	\$0.07
P12	1.2	3.15	19.02	4,625	\$0.06
P13	1.2	3.15	19.02	6,196	\$0.07

trabajo. Lo presentado son solo estimaciones realizadas para alimentar el modelo creado. Toda estimación mostrada acá es totalmente perfectible.

5.3. Consideraciones para la asignación Manual

Como se mencionó en la Sección 3 antes de utilizar el modelo para obtener la asignación de equipos óptima se realizará una asignación manual. Entre las consideraciones utilizadas para la realización de esta asignación se encuentran las siguientes:

- La productividad del equipo considera los mismos factores operacionales que considera el modelo, es decir, disponibilidad mecánica, utilización y factor de llenado.
- El cambio de equipos entre bancos y fases se realiza de manera inmediata, es decir, no hay descuento de horas trabajadas al momento de cambiar un equipo de fase.
- No hay restricciones de espacio para la asignaciones de equipos.
- Se trabaja el tiempo exacto para que se agote el banco, es decir, no se redondean tiempos de trabajo. Luego de eso el equipo puede cambiar instantáneamente a otro lugar de trabajo.
- En caso de que un equipo no pueda operar en un banco debido a las restricciones de precedencias, este equipo es asignado al banco precedente para acelerar la producción.
- Los equipos disponibles son asignados a la fase con mayor material remanente.

Tabla 5.4: Área mínima de operación para cada equipo de carguío

Modelo Pala CAT	Área mínima de operación [m ²]
6015/6015 FS	393
6015B	727
6018/6018 FS	515
6020B	806
6030/6030 FS	581
6040/6040 FS	727
6060/6060 FS	806
6050/6050 FS	806
6090 FS	1,161
7295	1,029
7395	1,239
7495 HD	1,239
7495 hf con cuerda de avance	1,491

5.4. Incorporación de datos al Modelo

La forma en la que el modelo lee los datos que se van a utilizar para la resolución del problema es a través de un archivo Excel, el cual presenta distintas hojas en las cuales se debe completar toda la información requerida. En la siguiente sección se presenta una descripción de los parámetros que se incorporan al modelo junto a los valores que se utilizaron en este trabajo.

5.4.1. Parámetros Generales

En esta hoja se incorporan los datos generales al proyecto y son transversales a todas las fases. Los parámetros requeridos se presentan a continuación:

- **Holgura:** corresponde al porcentaje del tonelaje del periodo total que se desea extraer en el total de periodos. Esto le da más flexibilidad al modelo en el momento de realizar pruebas para garantizar de que el problema no sea infactible.
- **Factor de descuento:** es la tasa de descuento por la cual se multiplicarán los costos de cada periodo para traerlos a valor presente. Debe ser incorporado como $1/(tasadedescuento)$.
- **MaxPala:** corresponde al número máximo de fases en las que una pala puede trabajar en un mismo periodo. Este valor se ajusta en función de las características de la operación y a la flexibilidad que se le quiera dar a la asignación de equipos.
- **Altura de banco y densidad:** estos dos parámetros se deben incorporar para que el modelo pueda ir ajustando las áreas de operación disponibles en función del tonelaje extraído en el periodo anterior.

- **MaxPlanta:** es el tonelaje máximo de mineral que se debe extraer para ser enviado a planta por periodo.
- **Holgura Planta:** de la misma forma que el primer punto, busca ponderar el tonelaje máximo de material con el cual se debe alimentar la planta con el objetivo de darle más holgura al modelo. En primer lugar se trabajaba con un mínimo tonelaje de alimentación, pero luego de varios experimentos se decidió por cambiarlo con el objetivo de que el problema no sea infactible debido a que no se cumplan los requerimientos mínimos en un periodo.

Los parámetros ingresados en este trabajo son presentados en la siguiente tabla, los valores subrayados cambian más adelante en función del ejercicio que se esté realizando en la sección 6 .

Tabla 5.5: Parámetros

Parámetro	Valor
H	1.0
FD	0.9
MaxPala	2.0
AB	12
SG	2.6
MinPlanta	1,672,916.6
HP	1.5

5.4.2. Características de Equipos de Carguío

Acá se ingresan las características de los de carguío con los cuales se correrá el modelo. Los equipos que se ingresan acá no son necesariamente todas los que se asignarán a los sectores de trabajo, dado que es el modelo el cual decide cuáles palas comprar.

La información de cada equipo que debe ser ingresada al modelo se presenta a continuación:

- **Área operacional:** es el área expresada en metros cuadrados que requiere el equipo para operar en un banco.
- **Costo Pala:** corresponde al costo de adquisición del equipo.
- **Costo de operación:** es el costo de operación del equipo expresado en *USD/ton*.
- **Productividad:** corresponde al ritmo de producción del equipo expresado en toneladas por hora. La producción ingresada debe ser independiente de los factores operacionales dado que estos se incorporan más adelante.
- **Disponibilidad:** es la disponibilidad mecánica que presenta el equipo en cuestión.
- **Factor de llenado:** corresponde al porcentaje real de llenado en función de su capacidad nominal.

Es importante comentar que el modelo permite la asignación de equipos sin considerar su compra, por ejemplo, en el caso de una operación que ya cuente con equipos de carguío y

Tabla 5.6: Palas

Pala	Área [m ²]	Costo [USD]	Costo [USD/ton]	Producción [ton/hora]	Disponibilidad	Factor de Llenado
P01	393	1,315,842	0.06	1,682.64	0.85	0.85
P02	727	1,719,034	0.09	1,902.95	0.85	0.85
P03	515	1,927,402	0.08	2,350.96	0.85	0.85
P04	806	2,664,860	0.08	2,845.36	0.85	0.85
P05	581	4,584,091	0.10	3,749.21	0.85	0.85
P06	727	5,276,123	0.08	5,168.53	0.85	0.85
P07	806	6,407,310	0.09	5,774.45	0.85	0.85
P08	806	7,188,689	0.08	7,472.82	0.85	0.85
P09	1,161	15,163,038	0.10	11,632.45	0.85	0.85
P10	1,029	8,699,355	0.08	2,617.87	0.85	0.85
P11	1,239	10,522,573	0.07	3,665.02	0.85	0.85
P12	1,239	11,824,872	0.06	4,624.90	0.85	0.85
P13	1,490	16,252,688	0.07	6,195.62	0.85	0.85

solo busque generar una asignación de ellos basta con que ingrese sus equipos en el modelo con costo de adquisición igual a cero.

Las características de los equipos de carguío utilizados se presentan en la tabla 5.6 .

Para la realización de los planes se consideró que solo se pueden adquirir como máximo dos equipos iguales.

5.4.3. Fases y bancos

La forma de ingresar la información asociada a las fases con sus respectivos bancos es, por cada uno de los bancos reportar; la fase a la cual pertenece, el área inicial de operación disponible, el total de material a mover y la fracción de mineral asociada a este tonelaje total. También se ingresa la utilización como factor operacional en forma de fracción y por ultimo alguna valorización (esto para el caso de la variación del modelo mostrada en la sección 4.2) la cual debe estar en *USD/ton*).

Los parámetros que se requieren son los siguientes:

- **Fase:** corresponde a la fase a la que pertenece el banco.
- **Banco:** es la numeración de los bancos. Estos deben enumerarse en orden creciente con la profundidad.
- **Área disponible:** espacio inicial disponible para que entre a operar un equipo.
- **Tonelaje Total:** total de material a mover en toneladas. Esto involucra todo el material del banco ya sea estéril o mineral.
- **Mineral:** razón Mineral/Tonelaje. No involucra la ley del material, dado que la clasificación y la decisión de destino del material ya se asume conocida.

- **Utilización:** factor operacional que busca representar las condiciones de trabajo de cada banco.
- **NSR:** valorización del banco, involucra los ingresos obtenidos por los elementos de interés y los costos asociados al procesamiento, transporte refinación y venta.

La información asociada a los bancos de cada fase se presenta en la tabla 5.7 .

Tabla 5.7: Fases y bancos

Fases	Banco	Área disponible	Tonelaje Total	Mineral	Utilización	NSR [USD/ton]
1	14	500	2,109,879	0.97	0.85	5,636.55
1	15	500	1,986,257	0.97	0.85	6,335.93
1	16	500	1,876,662	0.97	0.85	7,426.90
1	17	500	1,728,332	0.98	0.85	8,444.82
2	9	500	5,989,359	0.29	0.85	14,231.73
2	10	500	6,184,217	0.41	0.85	9,499.91
2	11	500	5,833,727	0.51	0.85	7,731.02
2	12	500	4,882,407	0.60	0.85	6,209.16
2	13	500	4,253,745	0.71	0.85	4,590.65
3	1	500	100,816	-	0.85	-
3	2	500	314,533	-	0.85	-
3	3	500	602,770	-	0.85	-
3	4	500	933,899	-	0.85	-
3	5	500	1,176,520	-	0.85	-
3	6	500	1,335,261	-	0.85	-
4	7	500	2,214,944	0.09	0.85	2,468.78
4	8	500	2,505,574	0.14	0.85	1,845.20
4	9	500	2,896,096	0.28	0.85	926.81
4	10	500	3,323,287	0.40	0.85	357.74
4	11	500	3,746,793	0.48	0.85	96.54

5.4.4. Horizonte temporal de evaluación

La manera de ingresar los periodos al modelo, junto con la forma en que se construyó el modelo de optimización, permite que el problema sea bastante flexible en términos de horizontes de evaluación del problema. Esto quiere decir que los periodos pueden ser desde horas, días, meses, años o periodos de cualquier duración.

Los periodos se agregan ingresando cada uno en orden secuencial junto con la duración del periodo en horas. De esta manera, al trabajar la variable de decisión en forma de fracción, la productividad queda bien definida independiente de la duración del periodo, pudiendo incluso ser de distinta duración, permitiendo que el modelo sirva para realizar distintos tipos de ejercicios.

En la tabla 5.8 se muestran los 12 meses ingresados con la duración expresada en horas.

Tabla 5.8: Periodos

Periodo	Duración [horas]
1	720
2	720
3	720
4	720
5	720
6	720
7	720
8	720
9	720
10	720
11	720
12	720

5.4.5. Precedencias

Las precedencias de bancos entre fases se agrega mediante los *min* y *max lead*. Se ingresa cada restricción señalando la fase anterior, la fase posterior y la cantidad de bancos mínima y máxima entre fases. En caso de no existir alguna de las dos restricciones se debe marcar con un -1 por defecto.

Las precedencias utilizadas en este proyecto fueron obtenidas estudiando el diseño del rajo a medida que evolucionaba y son presentadas en la tabla 5.9 .

Tabla 5.9: Precedencias entre fases

Fase anterior	Fase posterior	Minlead	Maxlead
2	3	4	7
2	4	-1	4

Una vez con todos los datos y parámetros ingresados en el Excel se puede correr el modelo de asignación de equipos.

Capítulo 6

Análisis y Resultados

En este capítulo se darán a conocer los resultados de los distintos agendamientos realizados manualmente y los entregados por el modelo. Se mostrará en primer lugar los gráficos serrucho de cada fase mostrando las curvas de agotamiento de los distintos ejercicios, para luego ir mostrando las diferencias presentadas en función de los equipos seleccionados y las distintas restricciones que se consideraron. A continuación se presentan gráficos de producción con el material clasificado en función de su origen y luego mostrados de acuerdo a su destino. También se darán a conocer los gráficos serrucho comparando el plan original con respecto a los obtenidos mediante el modelo. Por último se comentará sobre el *sinking-rate* de los distintos planes y sobre los tiempos de cómputo de los distintos casos.

Con el objetivo de facilitar la representación y forma en que se presentan los resultados, se mostrará en éste capítulo de manera simultánea los resultados referentes a la asignación manual de equipos, la obtenida con el modelo y la obtenida en la exploración de posibles usos del modelo. Para esto se realizaron los siguientes ejercicios:

- A: Asignación manual de equipos seleccionando los de menor costo por tonelada.
- B: Asignación manual de equipos seleccionando los de menor costo de adquisición.
- C: Asignación de equipos según modelo considerando equipos de menor inversión.
- D: Asignación de equipos según modelo.
- E: Asignación de equipos según modelo con restricción de área.
- F: Asignación de equipos según modelo considerando ingresos por tonelada extraída.

6.1. General

Como resultado general de todos los ejercicios, se presentará la valorización económica de cada agendamento junto con los equipos seleccionados para cada caso.

Tabla 6.1: Resultados generales

Ejercicio	Equipos Seleccionados	Valor económico	Diferencia con modelo [%]
A	2 P01 - 2 P12	-\$27,952,761	-162.2
B	2 P01 - 2 P04 - P05	-\$15,179,433	-42.4
C	2 P01 - 2 P04 - P05	-\$12,186,563	-14.3
D	2 P01 - 2 P02 - 2 P03	-\$10,659,251	-
E	2 P01 - 2 P03 - P04	-\$10,719,519	-0.6
F	2 P01 - 2 P02 - 2 P03 P08	\$101,000,000,000	No aplica

De la tabla 6.1 se puede apreciar que el modelo que se corre con menos restricciones (Ejercicio D) entrega un costo menor que cualquier otra opción. También queda en evidencia que el costo disminuye entre el ejercicio B y el C es decir, el modelo logra encontrar una asignación mejor que la manual considerando los mismos equipos.

Otro resultado interesante del caso anterior es la diferencia entre el caso A y B, esto parece indicar que para el periodo de evaluación de 1 año el costo operacional no es tan relevante en relación al costo de adquisición en términos de decisión, ya que se ve la gran diferencia en el costo total. Esto quizás se revierta para cuando se evalúen varios años de operación, en donde el gran tonelaje a mover permita que el costo operacional sea parte importante de los costos totales.

El caso del ejercicio F no aplica para la comparación de costos dado que considera ingresos por las toneladas de mineral extraídas, cosa que ningún otro caso considera. Lo que si es relevante de este ejercicio es el plan de producción resultante, el cual será presentado en secciones siguientes.

A continuación se presentarán los resultados y análisis de los distintos ejercicios agrupados por fase. Dada la construcción que se le dio a las variables y a la ponderación del mineral en función del tonelaje total, se hace equivalente el estudio de los gráficos de Mineral que el de Estéril, en las secciones siguientes se presentará solo uno de los gráficos por fase.

6.2. Extracción de Material por fase

6.2.1. Fase 1

En la Fig. 6.1 se puede apreciar la diferencia de extracción de material en la Fase 1 para cada uno de los ejercicios realizados. Se puede notar una diferencia considerable de pendientes entre la curva A y B, eso se debe a que los equipos con mayor capacidad del caso A fueron asignados a fases con mayor tonelaje, quedando así que la velocidad de extracción del caso B sea mayor. Específicamente, en el caso B se le asignó el equipo P04 a la Fase 1 mientras que en el caso A se le asignó el equipo P01 siendo el primero de mayor productividad, tal como se muestra en la tabla 5.6.

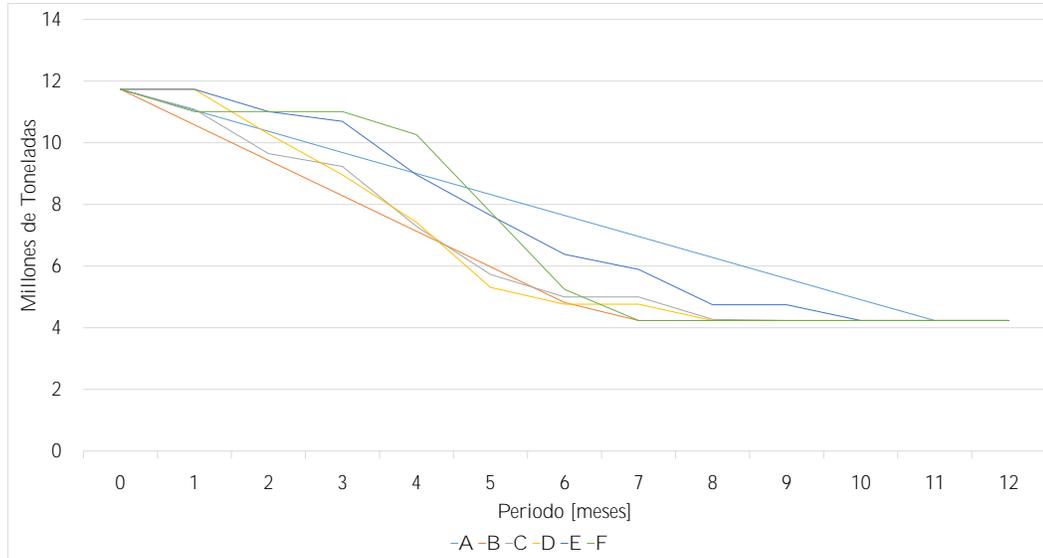


Figura 6.1: Gráfico Serrucho - Mineral Fase 1

La siguiente comparación interesante es la que sucede entre el caso B y C. En C se tienen los mismos equipos que en B, pero la distribución y asignación es realizada por el modelo. Entre las dos curvas se puede notar el caso C va siguiendo al B pero retrasando los movimientos de material. Esto se puede explicar a que como el modelo busca minimizar los costos, y dada la existencia de una tasa de descuento, trata de retrasar los movimientos de material y por tanto retrasar los costos.

Si se compara la curva C y D, la cual es la asignación según el modelo sin restringir los equipos, se puede notar claramente que el modelo determina una secuencia de extracción similar pero con otros equipos, de acuerdo a lo mostrado en la 6.1. En este sentido, la diferenciación de los equipos tiene un impacto mayor en los costos que la secuencia. Esto se debe al corto horizonte temporal que se está evaluando en donde los costos operacionales ven disminuida su relevancia, como se menciona en párrafos anteriores.

La restricción incluida en E es bastante interesante por que hace más real el problema. En este caso lo que provoca es que la extracción de material sea más lenta en el comienzo dada la necesidad de esperar que se disponga de espacio disponible para la operación. Si se considera la tabla 6.1 se puede notar que la opción E considera un menor número de equipos pero estos son con mayor capacidad, esto se debe a las restricciones de espacio dado que como no puede incluir dos equipos a producir en un sector debe incluir uno solo con mayor capacidad. La baja diferencia de costos se debe a la inclusión de un equipo menos y al mayor retraso de los tonelajes a extraer. La restricción de espacio se hace evidente en el retraso que posee esta curva en comparación a la D.

Por último al comparar las curvas D y F se puede notar el impacto que tiene la consideración de ingresos al movimiento de material. Dada la tasa de descuento no es conveniente retrasar completamente la extracción dado que los ingresos se ven descontados tanto como

los costos. En ese sentido se obtiene que la extracción completa de la fase en el caso F se da en el periodo 7 mientras que en el D se termina de extraer el material en el periodo 8. Otro detalle interesante queda evidenciado también en la tabla 6.1, en donde se puede ver que la opción F adquiere una mayor cantidad de equipos, lo que le permite alcanzar mayores tasas de extracción tal como sucede en los periodos 4, 5 y 6 en donde las pendientes son mayores a todas las presentes en la curva D.

6.2.2. Fase 2

El comportamiento de las curvas que se aprecia en la Fig. 6.2 representa la extracción de material en la Fase 2.

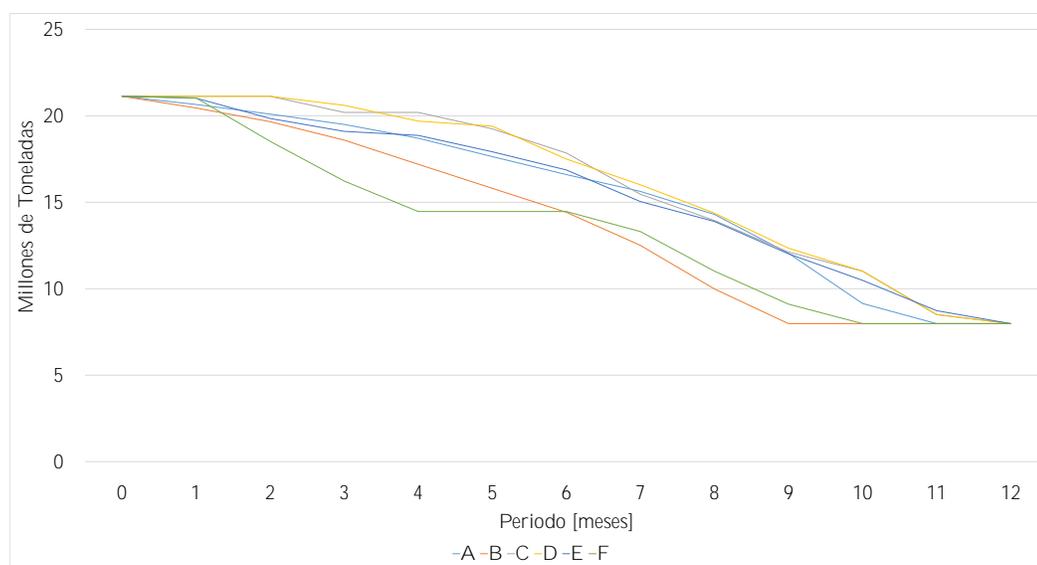


Figura 6.2: Gráfico Serrucho - Mineral Fase 2

En la Fase 2 se puede ver que las curvas que extraen más rápido el material son las asociadas al caso B y al F. Esto se debe a que en el primer caso se asignó el equipo de mayor capacidad a esta fase debido a que es la que posee mayor tonelaje a mover, mientras que en el segundo caso son los ingresos los que aceleran la extracción. Esto queda evidenciado en la tabla 5.7 en donde se aprecia que la Fase 2 es la que presenta mayores USD/ton .

La diferencia entre los casos A y B se debe a que simplemente la productividad del equipo asignado a la fase 2 en el caso A (P12) no supera la de los equipos asignados en el caso B (P05 y P04).

En relación al caso C se puede notar que el modelo encuentra una combinación de los equipos del caso B que logra retrasar la extracción del material, minimizando los costos asociados al manejo de material. De igual manera el caso D retrasa más aún los tonelajes al poseer libertad de selección de equipos, tal como sucede en la Fase 1.

Observando la curva E se puede notar que en los primeros periodos, desde el 0 hasta el 9, la curva va por debajo de la curva D. Esto se debe a que al estar restringido por el espacio operacional, la curva E no puede permitirse aumentar la pendiente de la curva con tal de completar la extracción de todo el tonelaje, por lo que debe mantener su extracción constante. En el periodo 10 se puede ver como la curva D aumenta la tasa de extracción con respecto a la de la curva E, lo cual realiza independiente del espacio operacional.

6.2.3. Fase 3

La Fase 3 es interesante de estudiar dado que el tonelaje asociado corresponde solo a estéril, el cual se muestra en la Fig. 6.3.

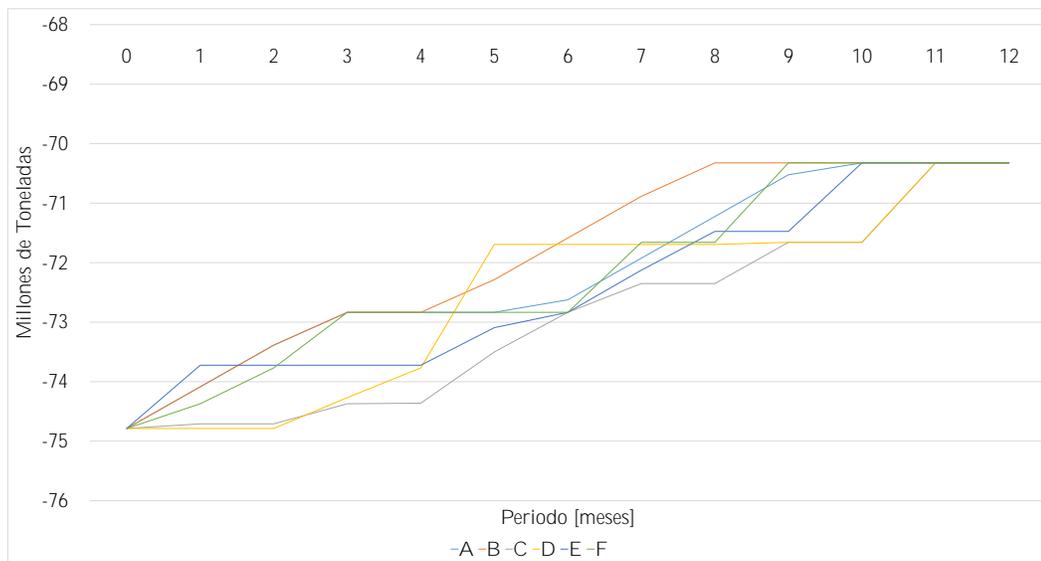


Figura 6.3: Gráfico Serrucho - Estéril Fase 3

Los análisis de las curvas son similares a las de las fases anteriores, por lo que se comentará solo sobre los comportamientos que difieren de los anteriores o que presentan comportamientos interesantes. En ese sentido, llama la atención que la curva C, D y F tengan varios periodos en los que detienen la extracción de material de esta fase. Eso se debe a que como los tonelajes de estos bancos son relativamente menores a los de otras fases pueden permitirse dejar la extracción para periodos futuros. Por otro lado, las restricciones asociadas a las precedencias obligan que ciertos bancos sean extraídos para poder continuar la extracción en las otras fases lo que obliga a extraer ciertos bancos en momentos determinados para luego dejar *stand by* la fase. Esto último queda evidenciado claramente al observar la curva F, como la Fase 3 posee solo estéril esta curva debería extraer estos bancos en los periodos finales, pero las precedencias la obligan a trabajarlos para permitir la obtención de ingresos de las otras fases.

6.2.4. Fase 4

El comportamiento de las curvas en este caso es bastante similar al de las fases anteriores.

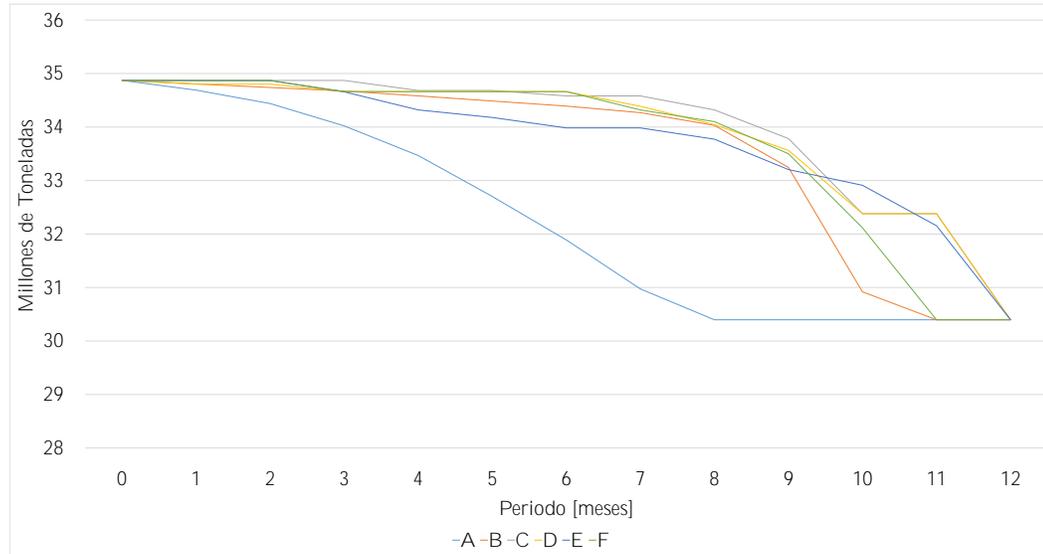


Figura 6.4: Gráfico Serrucho - Mineral Fase 4

Lo primero que resalta a la vista en la Fig. 6.4 es la curva asociada al ejercicio A, en donde la extracción va mucho más rápido debido a la capacidad del equipo asociado.

La curva del ejercicio D retrasa la extracción de material con el fin de retrasar los costos. En este caso, y debido a los bajos ingresos asociados a estos bancos que se muestran en la tabla 5.7 la curva F también retrasa los tonelajes.

Para este caso se estudió con más detalle la asignación de equipos, de manera de entender la diferencia de costos y de movimientos de material.

Tabla 6.2: Horas asignadas por equipo en la Fase 4

Equipo	P01	P01	P04	P04	P05	Total
B [hrs]	1,730.871	7,348.628	1,073.312	1,073.312	1,073.312	12,299.436
C [hrs]	720.000	735.825	2,310.032	2,154.613	1,805.660	7,726.130

En la tabla 6.2 se puede notar que el modelo logra extraer el mismo tonelaje con menos horas asignadas, lo cual logra distribuyendo de mejor manera los equipos con el fin de aprovechar de menor manera su productividad.

6.3. Planes de Producción

A parte de los gráficos mostrados en la sección anterior, también se obtuvo los tonelajes de movimientos de material para cada ejercicio. A continuación se estudiarán los resultados de los ejercicios D, E y F. El primero se definirá como caso base del modelo, el segundo se estudiará para ver el impacto de la consideración de restricción de área y el último para ver como la consideración de ingresos afecta la distribución de los equipos y por tanto la extracción de material.

En primer lugar se muestran gráficos en los cuales el material está clasificado según su destino, además de mostrar la ley de cobre promedio enviada a planta.

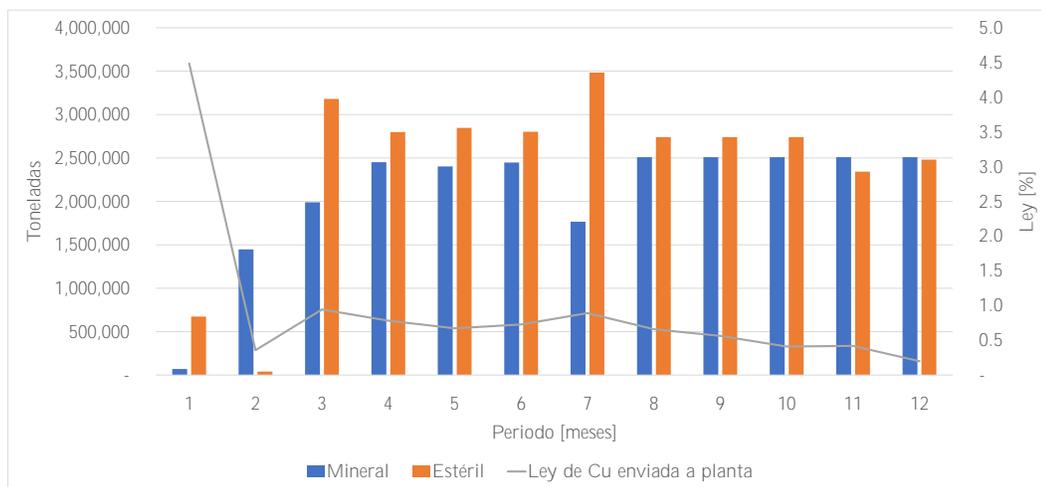


Figura 6.5: Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio D

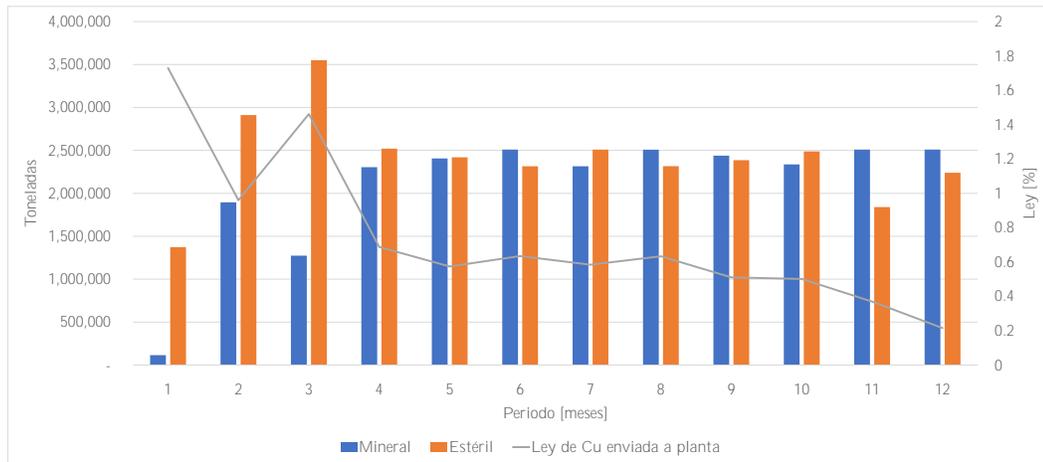


Figura 6.6: Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio E

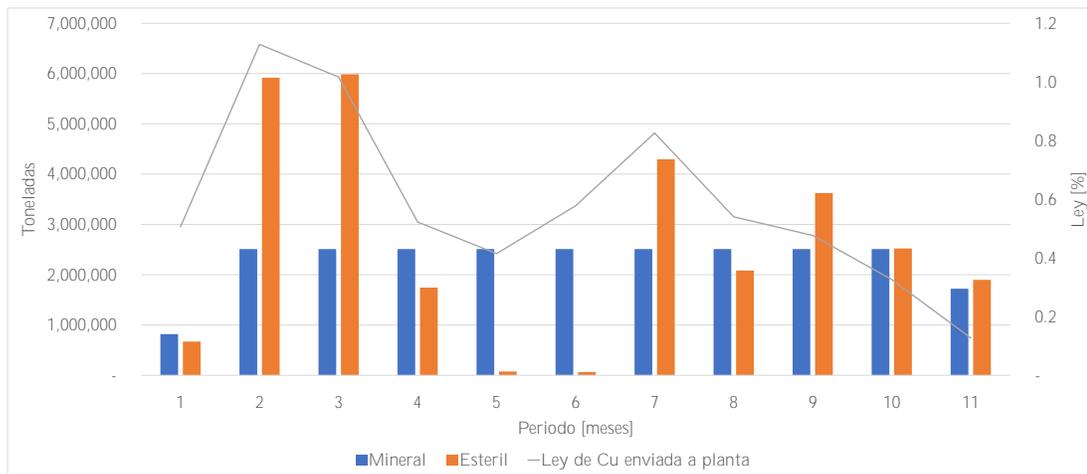


Figura 6.7: Plan de producción con ley de Cu enviada a planta - Ejercicio F

En las siguientes figuras se puede apreciar los distintos planes de producción asociados a cada ejercicio, pero ahora con el material identificado de acuerdo a la fase de la que se extrajo. Los planes de producción restantes son mostrados en los Anexos B.1.

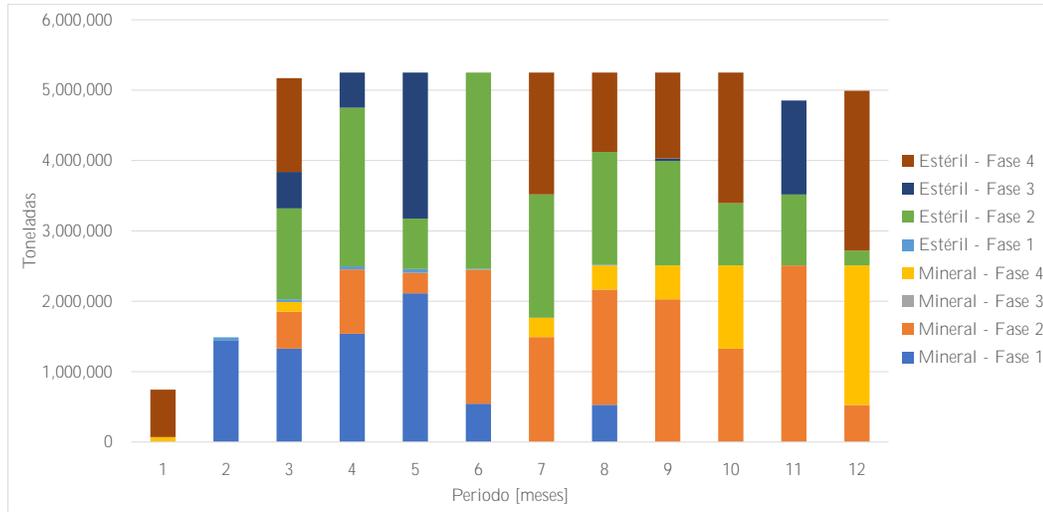


Figura 6.8: Plan de producción identificando origen de material- Ejercicio D

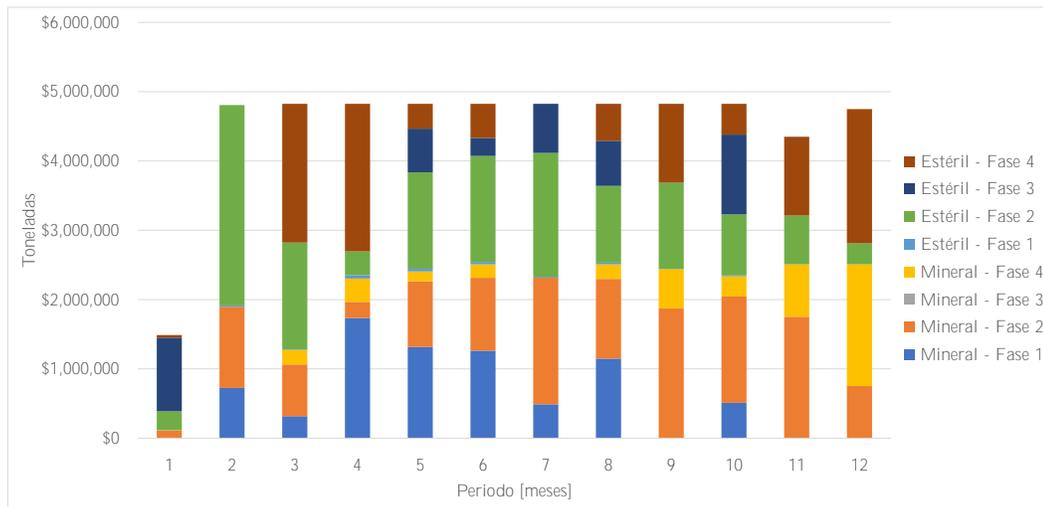


Figura 6.9: Plan de producción identificando origen de materia - Ejercicio E

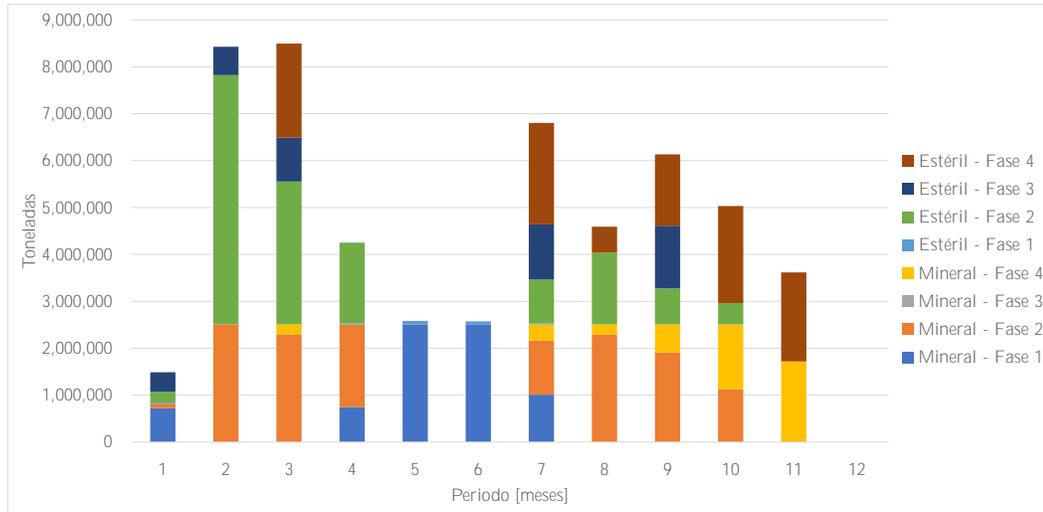


Figura 6.10: Plan de producción identificando origen de materia - Ejercicio F

En torno a los gráficos anteriores, se puede notar en la Fig. 6.5 que la alimentación a la planta presenta un ramp up hasta el periodo 4 para luego mantenerse estable en general (excepto el mes 7 que se ve incrementado el movimiento de estéril). Esto se debe a que el año se ve aislado de los años anteriores y por lo tanto el ramp up se ve en este año y no al momento de comenzar la explotación de la mina (año 1). En este sentido, el resultado obtenido es lo esperado en ese aspecto.

En la Fig. 6.6 se ve algo similar al caso anterior, en donde los tonelajes se mantienen estables salvo ciertas caída en alimentación a la planta (sin considerar el periodo inicial) . En este sentido, se puede ver que al incluir las restricciones de área en los sectores de trabajo se necesita balancear la extracción de material en todos los periodos dado que no se puede dejar toda la extracción concentrada en los periodos finales con tal de minimizar la valorización de los costos.

Para el caso de la Fig. 6.7 al incluir ingresos por el mineral extraído se puede apreciar que lo que mas cambia con respecto a los casos anteriores es el movimiento de estéril. Esto se debe a que, como la Fase 2 presenta mayores leyes, el modelo adelanta su extracción como prioridad tal como se muestra en la Fig. 6.10.

Pasando a un análisis más detallado se puede notar en la Fig. 6.10 que el ejercicio F no presenta tanta robustez en términos de alimentación de mineral a la planta dado que el mineral extraído en cada periodo muestra una predominancia clara de alguna fase e incluso en algunos periodos proviene de una sola fase, lo cual no es muy bueno en términos de seguridad del plan. Lo mismo sucede en la Fig. 6.8 para el ejercicio D, en los periodos 5, 9 y 10 se nota claramente la dependencia de una fase en la producción. En el caso E se puede notar en la Fig. 6.9 un mayor balance en la alimentación de mineral a la planta entre las 3 fases, lo cual

hace que el plan sea más robusto. Lo anterior se debe a que la necesidad de ir abriendo el espacio de operación periodo a periodo, en el caso E, obliga a que la operación de las fases sea más continua periodo a periodo.

En cuanto a las leyes mostradas en los 3 primeros gráficos, en el caso D y E se ve en el primer periodo una ley considerablemente mas alta que la de los demás periodo, esto se debe al bajo tonelaje de mineral que es enviado a planta y que los bancos extraídos en ese periodo provienen de fases de alta ley. Luego del primer periodo las leyes son balanceadas y decaen en el tiempo. La variación de ley en el caso F se debe a que la extracción de mineral se concentra en la Fase 2 en los periodos 2,3 y 7. Es necesario recordar que la ley no se controla en este modelo, dado que éste solo extrae el material del banco como un todo y la *riqueza* de los bancos la identifica de acuerdo a la relación *mineral/tonelaje*.

Es importante mencionar que la discontinuidad en el material total de extracción se debe a que no hay ninguna restricción que limite los movimientos minas totales por periodo dado que esta capacidad máxima está dada por los equipos que se encuentren disponibles. La única restricción en torno a movimientos está asociada a una alimentación máxima por periodo a la planta.

6.4. Gráfico Serrucho

En la siguiente sección se mostrarán los gráficos serruchos de algunos casos comparados con los del plan de largo plazo. El resto de los gráficos serruchos se presenta en los Anexos B.2.

A continuación se mostrará el gráfico serrucho para el ejercicio E comparado con la extracción constante y regular. Las lineas rectas están asociadas a la extracción constante proveniente de los datos mientras que las otras son resultantes del modelo.

En la Fig. 6.11 se puede apreciar que para el mineral en las Fases 2 y 4 la extracción es más lenta que la estimada según una extracción constante mientras que la Fase 1 lo hace más rápido después del periodo 4. Esto puede significar que al momento de poner en marcha el plan se presenten problemas con la alimentación de mineral a la planta, sobre todo los primeros meses. Esto se ve potenciado debido a que la Fase 2 es la que posee las mayores leyes. Sin embargo, se debe considerar que el Caso E no considera ingresos por las toneladas extraídas, por lo cual se hace necesario observar los resultados del caso F.

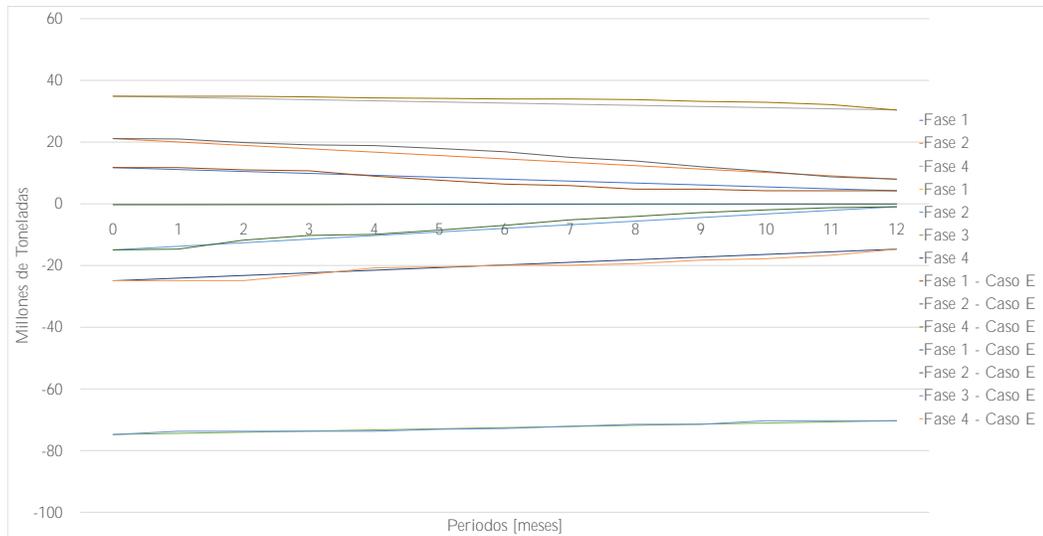


Figura 6.11: Gráfico Serrucho - Caso E

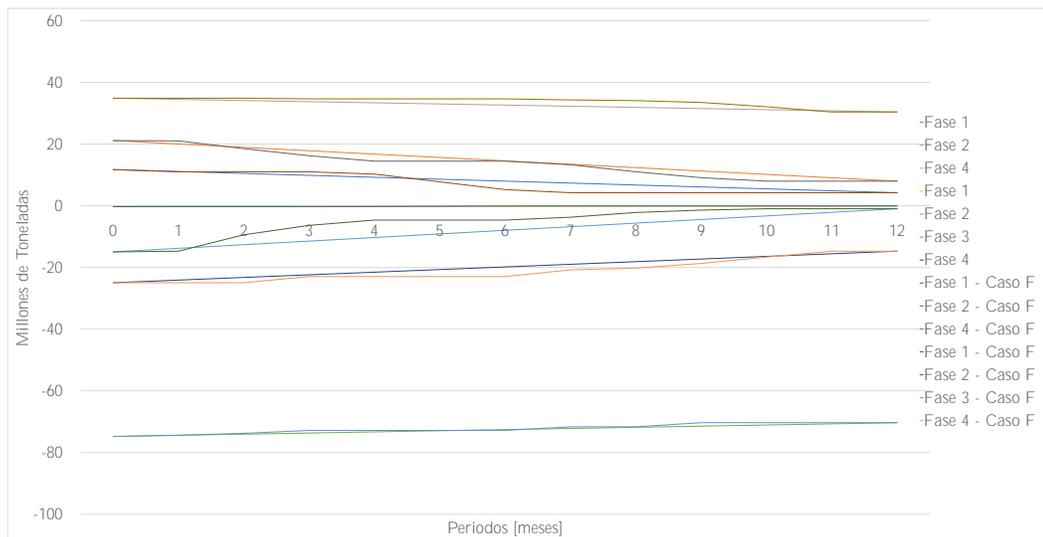


Figura 6.12: Gráfico Serrucho - Caso F

La Fig. 6.12 muestra la extracción de material considerando el ingreso resultante de la extracción del material. Se puede apreciar que la extracción de las Fases 1 y 2 se acelera, como también la extracción de estéril de las respectivas fases. En este caso, la alimentación a la planta se ve más segura dado que hay dos fases adelantadas en extracción de mineral.

Es importante recordar en este punto que, debido a la forma en la que se construyó el modelo, la extracción de mineral y la de estéril están directamente relacionadas. En ese sentido sería interesante lograr sectorizar los bancos entre estéril y mineral con el fin de obtener un resultado más realista.

6.4.1. Tasa de hundimiento

Otra forma de cuantificar la operatividad de un plan es verificando la tasa de hundimiento o “sinking-rate” el cual se interpreta como el número de bancos que se extraen por año. Este valor es importante porque mientras más alto sea, menos factible es el plan dado el número de trabajos que se deben realizar para un año.

En este caso, como todos los planes deben extraer la misma cantidad de bancos en el rango de un año, se realizará el análisis de bancos extraídos por mes. De esta manera si algún plan entrega que en un periodo se deben extraer una cantidad excesiva de bancos volverá el plan poco factible operacionalmente.

Los bancos extraídos por periodo para cada plan de cada fase son mostrados en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Bancos extraídos por periodo

Fase	Ejercicio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
1	D	-	0.7	0.7	0.8	1.2	0.3	-	0.3	-	-	-	-	4.0
	E	-	0.4	0.2	0.9	0.7	0.7	0.3	0.7	-	0.3	-	-	4.0
	F	0.4	-	-	0.4	1.3	1.4	0.6	-	-	-	-	-	4.0
2	D	-	-	0.3	0.5	0.2	0.8	0.5	0.6	0.7	0.5	0.8	0.2	5.0
	E	0.1	0.7	0.4	0.1	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0.5	0.6	0.2	5.0
	F	0.1	1.3	0.9	0.6	-	-	0.4	0.8	0.6	0.4	-	-	5.0
3	D	-	-	2.2	0.8	2.0	-	-	-	0.0	-	1.0	-	6.0
	E	3.0	-	-	-	0.7	0.3	0.6	0.5	-	0.9	-	-	6.0
	F	2.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0	-	1.0	-	-	-	6.0
4	D	0.3	-	0.7	-	-	-	0.8	0.5	0.6	0.9	-	1.2	5.0
	E	0.0	-	1.0	1.0	0.2	0.2	-	0.3	0.6	0.2	0.6	1.0	5.0
	F	-	-	1.0	-	-	-	1.0	0.3	0.7	1.0	1.0	-	5.0

Como se puede apreciar, los valores resultantes no son excesivos como para generar problemas e interferencias en los trabajos de preparación. Los valores altos que se presentan en la Fase 3 en el periodo 1 son debido al bajo tonelaje que los primeros bancos de esa fase presentan. Si se puede apreciar ciertas discontinuidades en la extracción de material de las fases para el caso de los ejercicios E y F, en donde presentan varios periodos sin extracción de material.

6.5. Tiempos de Cómputo

En la Tabla 6.4 se presentan los distintos tiempos de resolución para cada ejercicio y los gap obtenidos en la resolución del problema de optimización.

Tabla 6.4: Tiempos de resolución y Gap

Ejercicio	Tiempo de Resolución [seg]	Gap [%]
A	Manual	-
B	Manual	-
C	218.9	2.82
D	5021.5	2.94
E	7312.1	2.86
F	785.6	0.06

La realización de los ejercicios A y B, al no ser resultados del modelo tomó más tiempo y varios intentos. Para el caso B se realizaron varios intentos de asignación con varias combinaciones de equipos pero los primeros 3 intentos no lograban realizar la extracción total del material. El caso A resultó con menos intentos que el B, pero fue debido a lo aprendido en los intentos anteriores de asignación. Cabe mencionar que en estos dos ejercicios la asignación no es la óptima en términos de costos, solo es una de las posibles asignaciones que cumplen con extraer el tonelaje en tiempo establecido.

En el ejercicio C la resolución es bastante rápida en relación a las demás. Esto se debe a la reducida cantidad de equipos disponibles para el modelo, por lo cual no tiene que evaluar tantas opciones. Por otro lado, en el ejercicio D se toma bastante tiempo en encontrar la solución y en el ejercicio E se demora aún más, esto se produce en parte al existir el duplicado de equipos. Como se mencionó en la sección 5.4.2 se considera que solo se pueden adquirir un máximo de dos equipos por tipo de pala, esto quiere decir que al modelo se le ingresan 26 equipos siendo los equipos 14 al 26 los duplicados de los primeros 13. Tener dos opciones iguales para un problema de optimización aumenta el número de iteraciones que se deben realizar.

El caso F es más rápido de resolver que el D y el E dado que al considerar ingresos y maximizar el VAN le es más fácil discernir en la asignación.

6.6. Asignación de Equipos

A continuación se muestra un ejemplo de la asignación de dos equipos en el caso E realizada por el modelo. La asignación se muestra en la tabla 6.5,

Se puede apreciar la asignación de la pala P03 y la P01 en los distintos bancos de las fases en donde lo primero a notar es la diferencia entre la continuidad de las asignaciones. En el caso de la pala P03 se ve una clara continuidad en la asignación dado que la pala la mayor

parte de las veces está asignada a un solo banco por periodo. Por otro lado, en el caso de la pala P01, se ve que el mismo equipo es asignado a distintos bancos de trabajo en un mismo periodo. Esto se debe a que al estar estudiando el caso E, y dada las áreas operacionales mostradas en la tabla 5.7 y las dimensiones de los equipos en la tabla 5.6, el único equipo que puede partir con la explotación en los bancos es la pala P01. De esta manera los dos ejemplares de palas P01 que se encuentran disponibles en el modelo se reparten en los bancos con el objetivo de abrir el espacio de operación para la llegada de equipos mas grandes.

Es importante comentar que no se tiene alguna penalización de producción asociada a los cambios de ubicación de los equipos dado que la inclusión de esto en el modelo aumenta considerablemente la complejidad en contrucción del modelo. Con el objetivo de reducir los cambios de zonas de trabajo de los equipos se considera el parámetro *MaxPala* en la sección 5.4.1.

Tabla 6.5: Ejemplo de asignación en horas por periodo

Pala	Fase	Banco	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
P03	1	14			85	720									
		15					720								
	2	9		720											
		10						720							
		11							720	720					
		12									720	720			
	4	7			635										
		10												720	
		11													720
	P01	1	15				720								
16								470							
17										34					
2		9	372	720	683										
		10					236								
		12								90		612			
		13												671	
3		2	304												
		4	43						250						
		5								686	452				
		6									178		108		
4		8			37										
		9					484								
		10										720			
	11												49	720	

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas de este trabajo junto con las posibles extensiones que se pueden desarrollar a partir de lo desarrollado.

7.1. Conclusiones

- 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 la capacidad de movimiento asociada a equipos reales en vez de a un movimiento diario definido permite obtener un plan que se ajuste mejor a lo que sucede en realidad en la operación minera, permitiendo estimar ingresos y costos de manera más exacta así como también determinar vulnerabilidades en la alimentación a la planta. Es en este punto en donde el modelo alcanza su máximo potencial de utilización, dado que la mayoría de los software de planificación obtienen planes de producción que no consideran los factores operacionales involucrados en la operación minera y realizan los cálculos de producción con movimientos mina definidos (TPD).
- En términos de control sobre el agotamiento de mineral el modelo permite regular el paso de una fase a otra por medio de los *Min y Max Lead*. Permitiendo así adelantar o retrasar el comienzo de la extracción de una fase en específico.
- Dada la forma en que fue construido el modelo se le puede dar una gran variedad de usos dentro de las cuales destaca la determinación de flota de equipos, la cual puede ser utilizada en los proyectos greenfield.
- La decisión de qué equipos comprar no puede ser tomada en función de un solo parámetro ya que se deben considerar el horizonte temporal en el cual se va a utilizar el equipo y considerar los costos variables y los fijos.
- El costo de inversión de equipos posee mayor impacto que el secuenciamiento de la extracción en la resolución del modelo para horizontes temporales de evaluación no

muy largos, en este caso los costos asociados a la producción de un año no se compara al costo de adquisición de los equipos.

- La inclusión de restricción de áreas induce que la asignación de los equipos a los bancos sea mas balanceada y realista, evitando que el modelo sobrecargue de equipos los sectores de trabajo con el fin de retrasar la extracción lo más posible para la minimización de los costos. Esta restricción debe ser trabajada de manera que su utilización sea parte del modelo base.
- Otra de las aplicaciones resulta de la variación de la función objetivo. Al incluir los ingresos por tonelada extraída se observa un cambio del plan de producción, el cual favorece la extracción temprana de los bancos con mayores ingresos. En esta linea es interesante destacar la flexibilidad que presenta el modelo dado que las restricciones que rigen la secuencia de extracción pueden ajustarse fácilmente a cualquier función objetivo.
- La asignación obtenida con el modelo puede servir como herramienta auxiliar en los estudios de simulación, dado que al obtener los lugares donde van a estar trabajando los equipos se pueden escoger momentos interesantes o críticos para ser simulados.

7.2. Trabajo Futuro

A partir de lo desarrollado en este trabajo se podrán realizar las siguientes extensiones:

- El modelo desarrollado en este trabajo permite complementar otras herramientas de planificación incorporando factores operacionales que hacen mas realista la estimación de producción. En este sentido, al modelo se le pueden incluir pérdidas operacionales asociadas con el traslado de los equipos de una fase a otra de manera de hacerlo aún más realista.
- La forma en la que se ingresan los periodos permite que se puedan estudiar varios casos interesantes, como por ejemplo la producción diaria o el estudio de años de producción. En caso de que se estudien intervalos prolongados que incluyan años se deberían implementar ajustes en las palas, aumentando los costos de operación y disminuyendo la productividad de manera de que el modelo pueda decidir en que momento cambiar el equipo recuperando el valor residual de la inversión del primer equipo.
- La forma en la que se ingresan los bancos permite realizar una subdivisión de los bancos pudiendo separar entre estéril y mineral e incluso llegar al nivel de polígonos. De esta manera se puede tener más control sobre lo que se va extrayendo en el tiempo.
- Si bien el modelo busca una solución óptima, el modelo en sí no está optimizado. Sería interesante poder mejorar la escritura y forma de creación de restricciones de manera que se demore menos en escribir el problema de optimización, favoreciendo el tiempo de obtención de resultados.
- Con el objetivo de hacer más realista el modelo se debería ocupar la simulación como herramienta para definir algún coeficiente de interferencia entre los equipos de carguío asignados en el mismo banco de trabajo, el cual puede ser implementado en el modelo.

Bibliografía

- Bozorgebrahimi, E. Hall R. A. Blackwell, G. H. (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.
- CostMine InfoMiner USA, Inc. (2007). «Surface Mining Equipment». En: *Mine and Mill Equipment cost*. 1st. Vol. 1. InfoMine USA, Inc. Cap. 1, págs. 28-31.
- 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.
- 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.
- Le-Feaux R. Galdames, B. Vázquez A. (2008). «Diseño y operaciones de minas a cielo abierto». En: 1st. Vol. 1. Cap. 13, págs. 165 -167.
- Lerchs, Helmut e Ingo F. Grossmann (1965). «Optimum Design of Open-Pit Mines». En: *Transactions, C.I.M.* LXVIII, págs. 17-24.
- Najor J., P. Hagan. (2006). «Capacity constrained production scheduling.» En: *Proc. 15th Internat. Sympos. Mine Planning Equipment Selection (MPES)* 7, págs. 1173-1178.
- Naoum S., A. Haidar. (2000). «A hybrid knowledge base system and genetic algorithms for equipment selection.» En: *Engrg. Construction Architectural Management* 7, págs. 3-14.
- Newman, Alexandra 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.
- Soumis F., J. Ethier J. Elbrond. (1989). «Truck dispatching in an open pit mine.» En: *Internat. J. Surface Mining Reclamation Environ.* 3, págs. 115-119.
- Valdez F. Lanata, M. Orosco W. (2011). *Programación Lineal en Gestión de Operaciones Mineras*. Ver. Preprint.
- Weintraub A., L. Barros A. Magendzo F. Ibarra C. Ortiz. (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

Obtención de Datos

A.1. Equipos de carguío

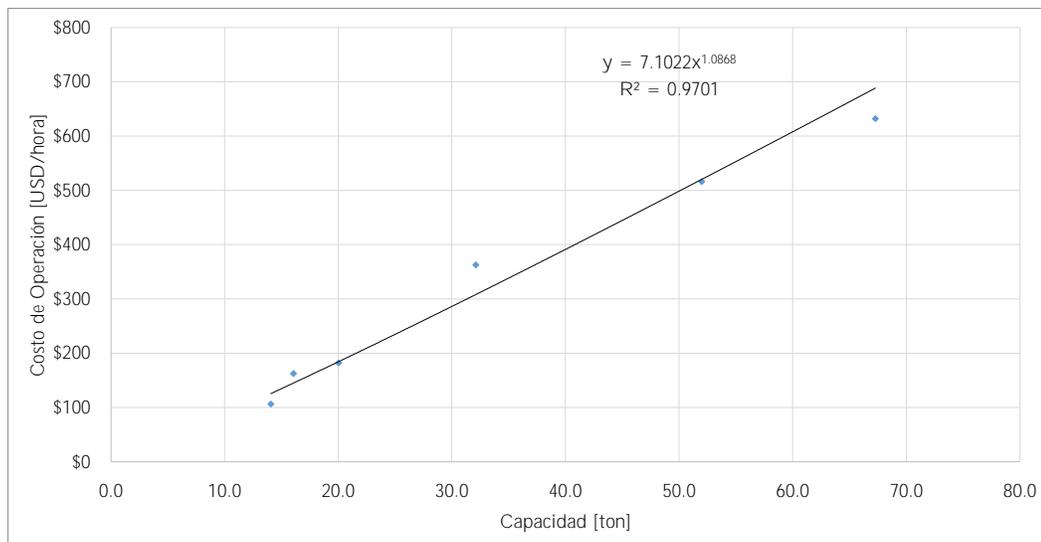


Figura A.1: Curva de Costo de Operación en función de la capacidad del equipo

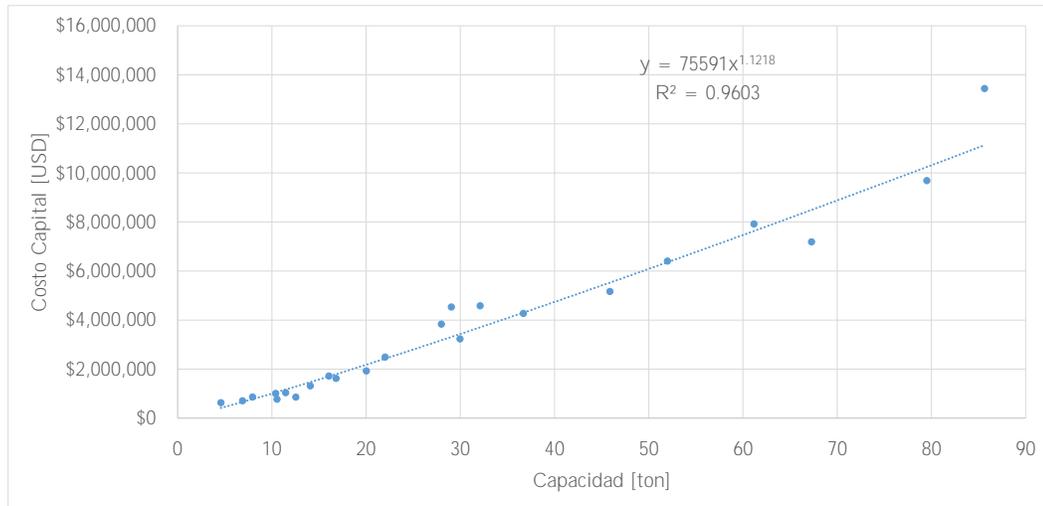


Figura A.2: Curva de Costo Capital en función de la capacidad del equipo

A.2. Equipos de Transporte

Tabla A.1: Parámetros equipos de transporte

Modelo Camión CAT	Capacidad [ton]	Ancho de Equipo [m]
758D	130	6.27
785C	136	6.27
789D	191	6.92
793D	218	7.6
793F	226.8	7.6
794F	291	8.738
795F AC	313	8.96
797F	363	9.52
MT4400D	244	7.6

Anexo B

Resultados

B.1. Planes de Producción

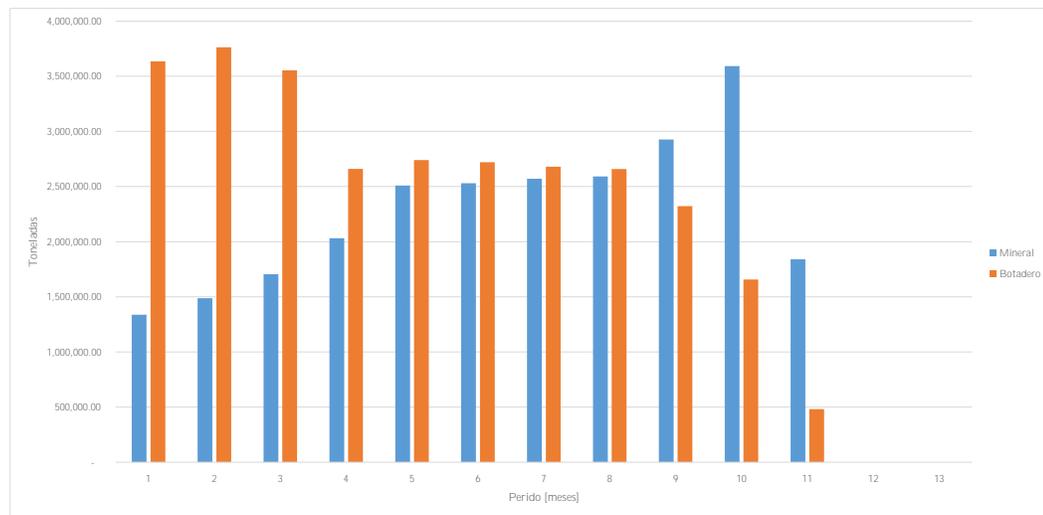


Figura B.1: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso A

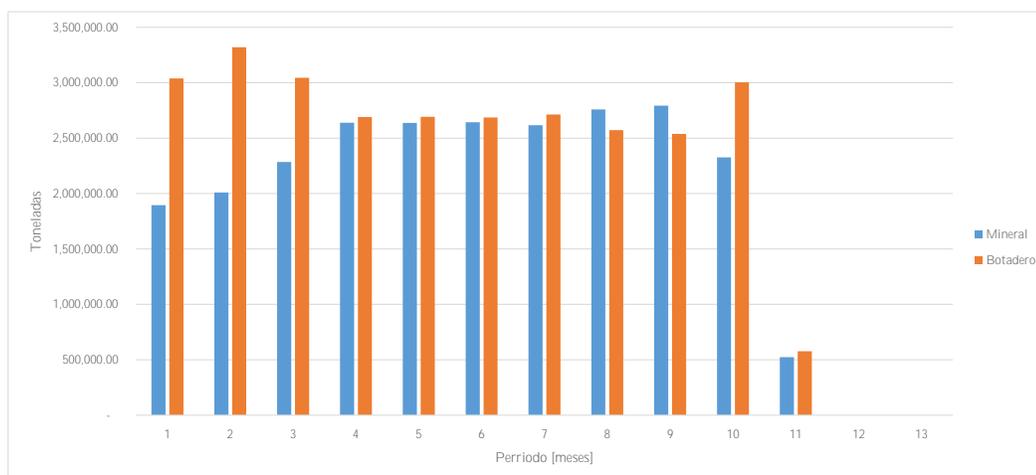


Figura B.2: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso B

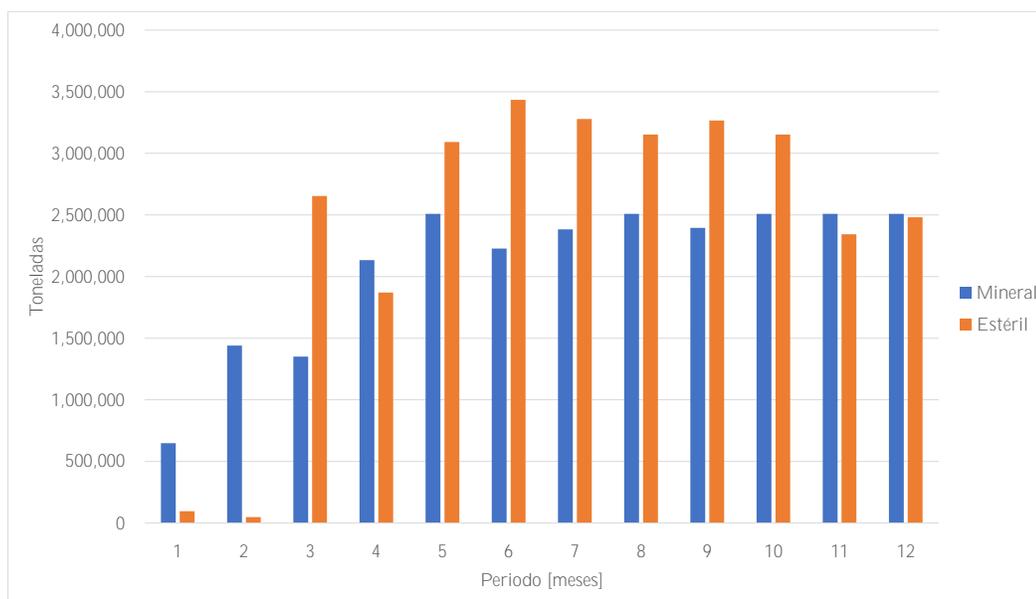


Figura B.3: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso C

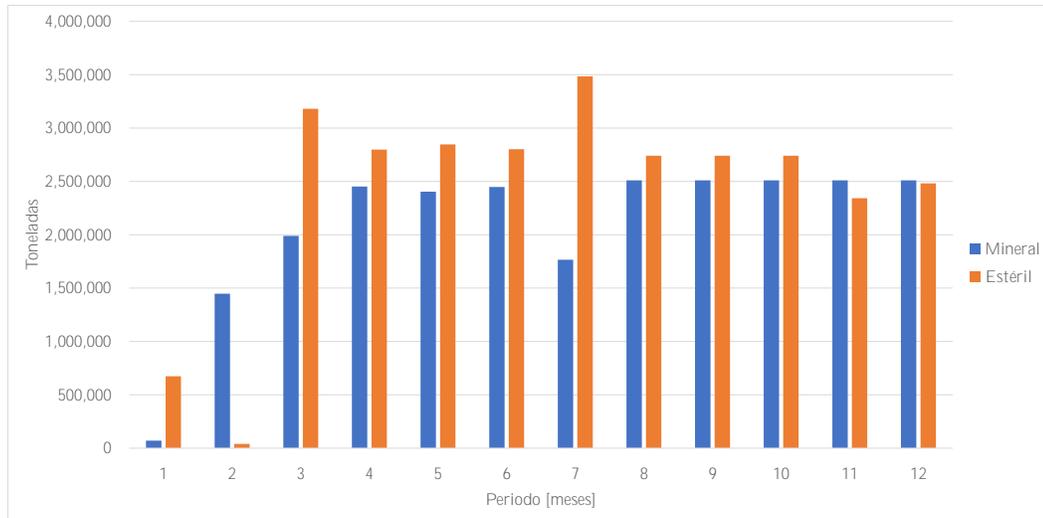


Figura B.4: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso D

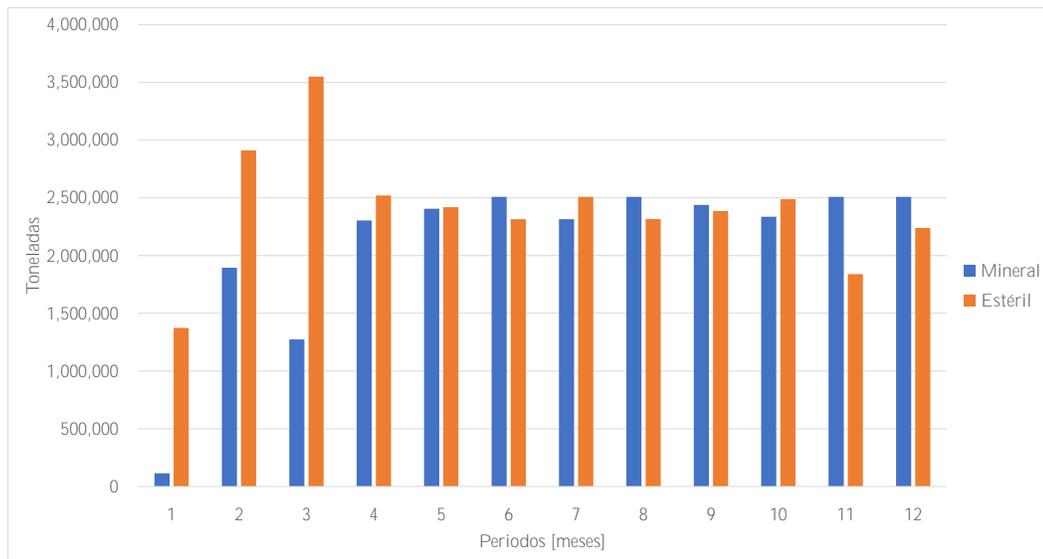


Figura B.5: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso E

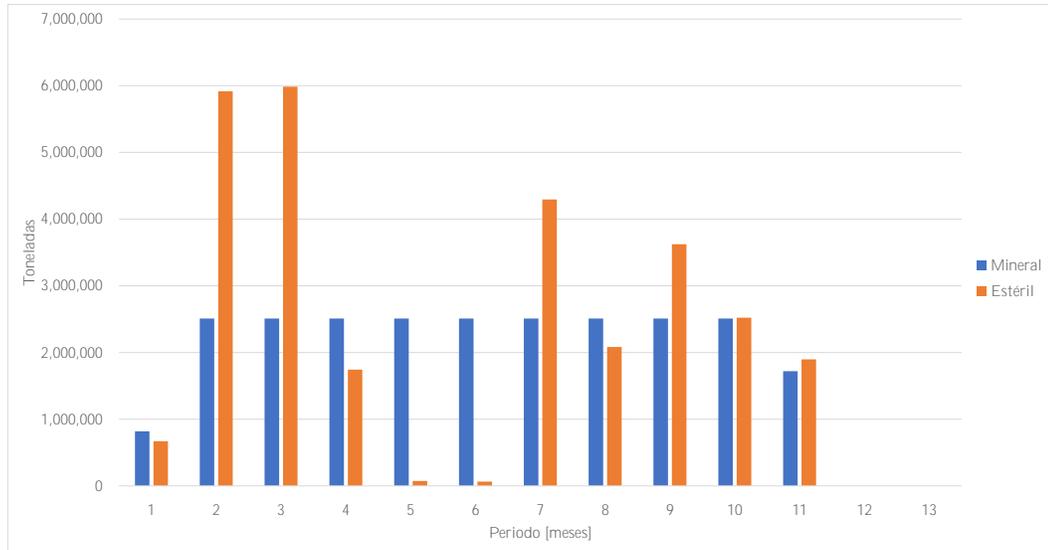


Figura B.6: Plan de producción generado con la Asignación Manual en el Caso F

B.2. Gráficos Serruchos

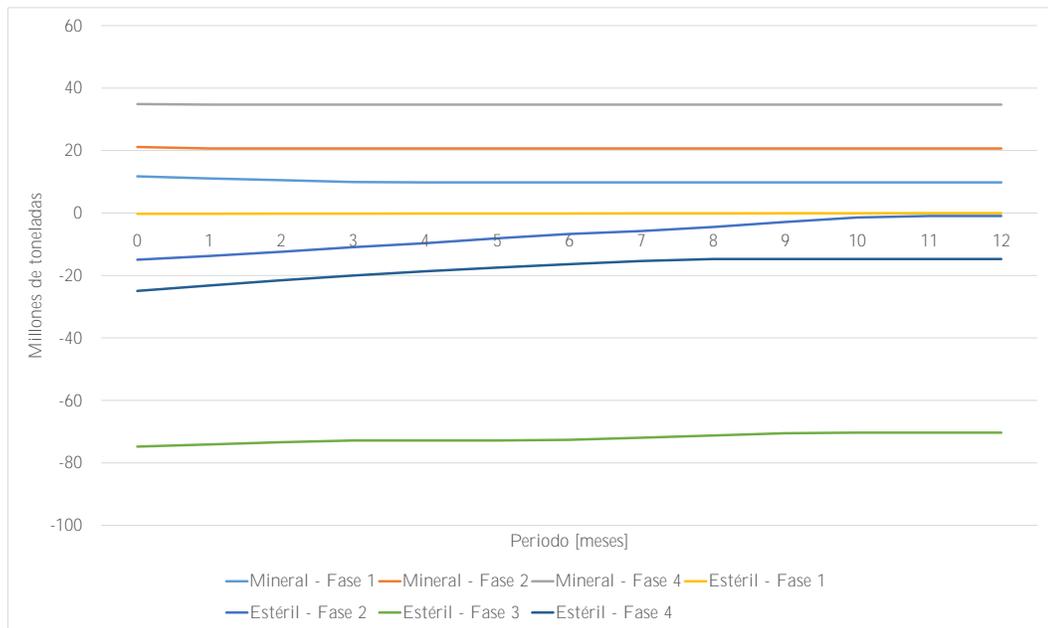


Figura B.7: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso A

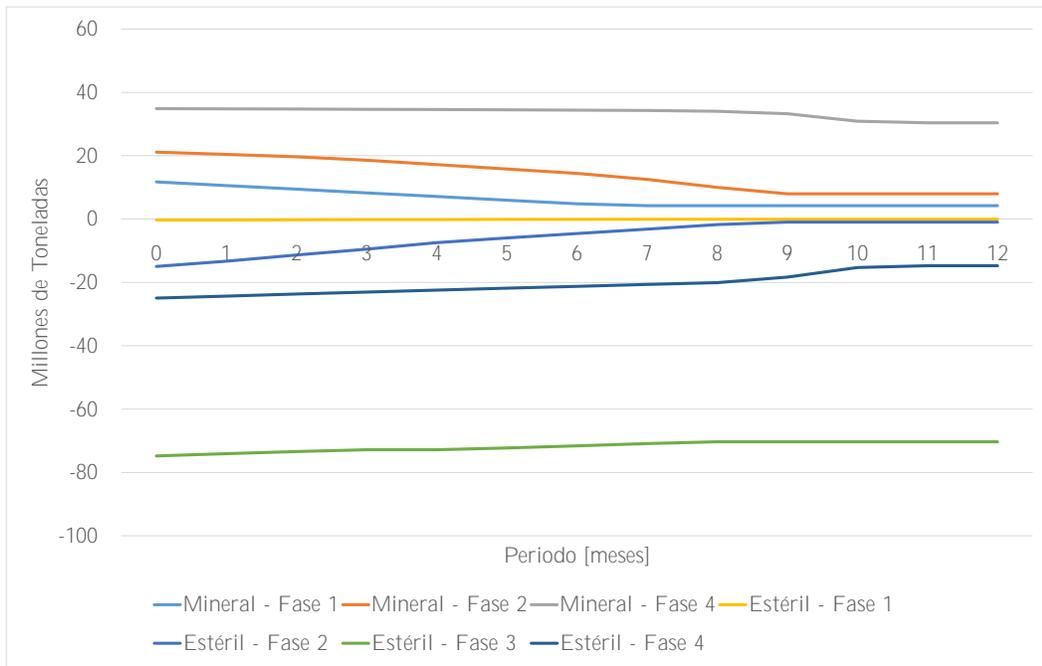


Figura B.8: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso B

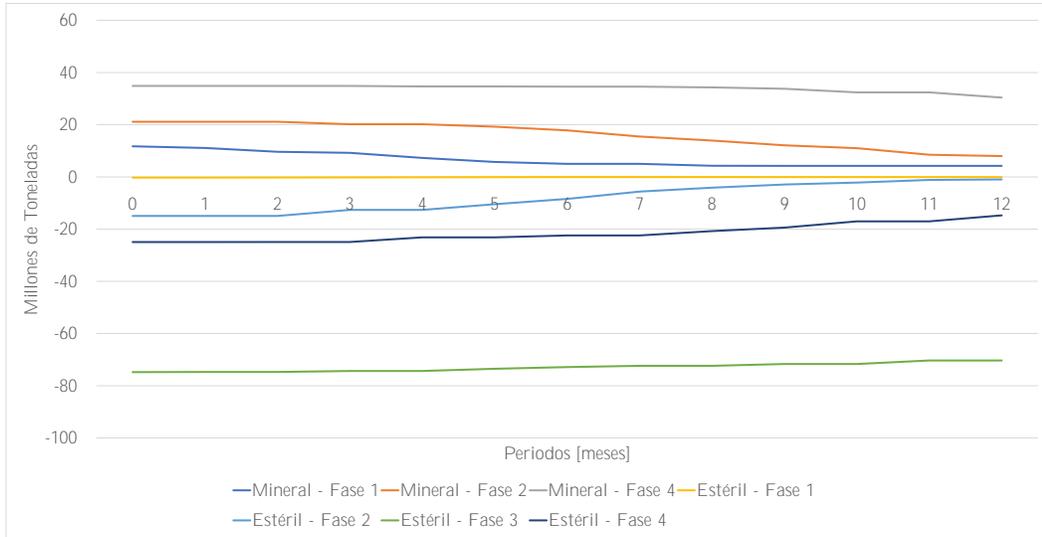


Figura B.9: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso C

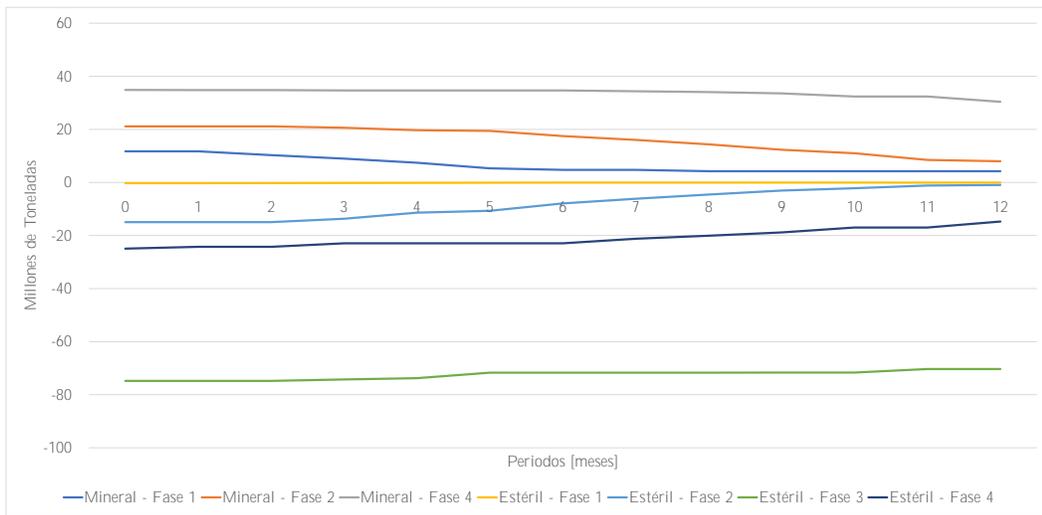


Figura B.10: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso D

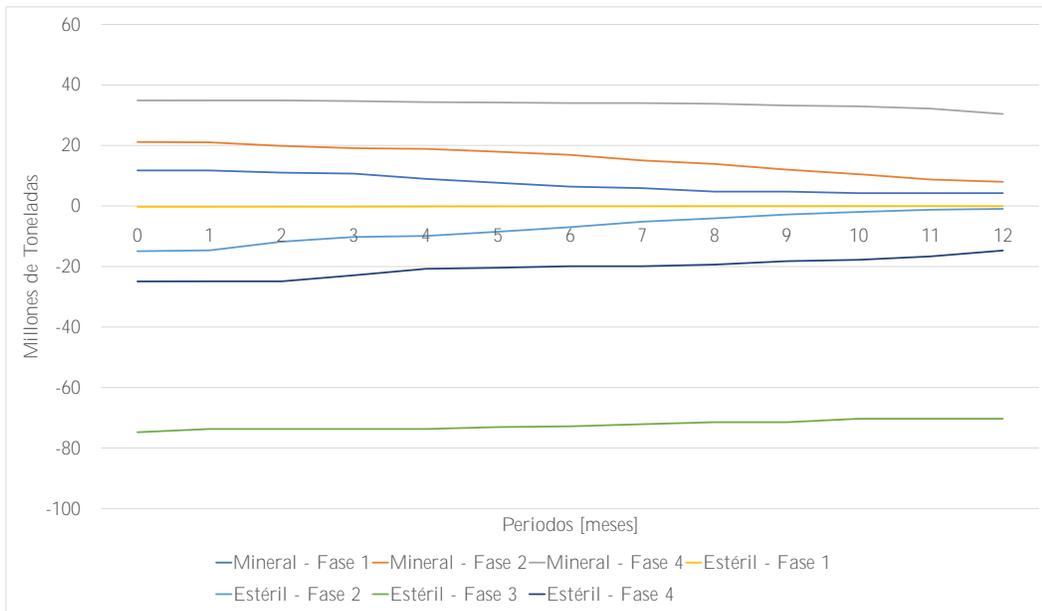


Figura B.11: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso E

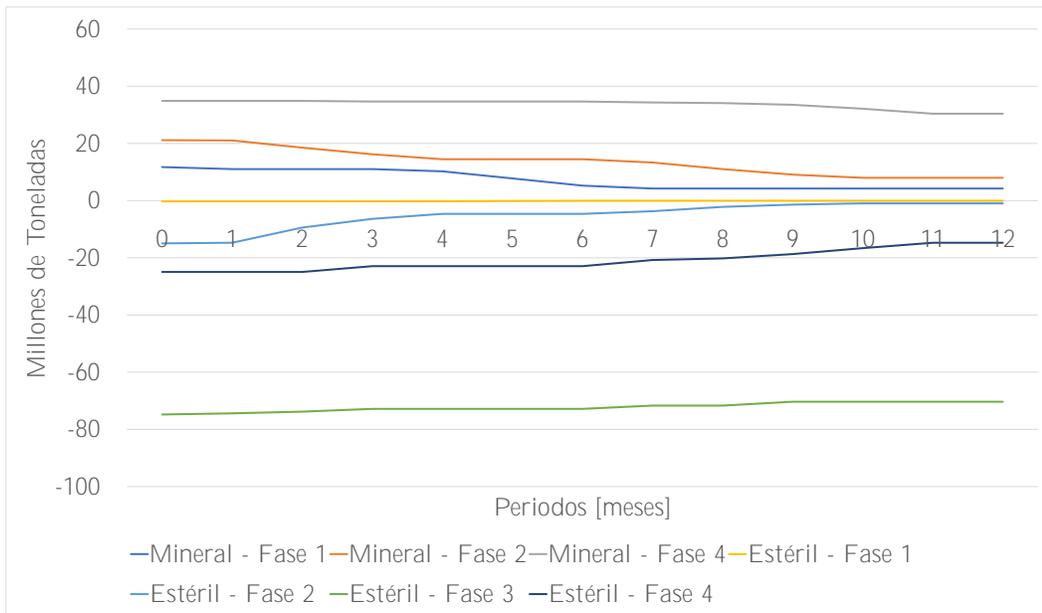


Figura B.12: Gráfico Serrucho generado con la Asignación Manual en el Caso F