



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

**VALIDACIÓN HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN VMM-BOS², EN ÁREA DE
PLANIFICACIÓN MEDIANO-CORTO PLAZO, EN COMPAÑÍA MINERA CERRO
COLORADO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PAULINA ALEJANDRA JOFRÉ MIRANDA

**PROFESOR GUÍA:
MARCELO VARGAS VERGARA
PROFESOR CO-GUÍA:
JORGE SOUGARRET LARROQUETE**

**MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
NELSON MORALES VARELA**

**SANTIAGO DE CHILE
2012**

RESUMEN

Actualmente la industria minera se enfrenta a procesos cada vez más complejos y desafiantes en la planificación de mediano y corto plazo; la tendencia a la baja en las leyes promedios de los yacimientos, el aumento de los costos operacionales, la mayor selectividad y aumento en mezclas de minerales, son las nuevas limitantes a la hora de lograr una cierta producción.

La falta de herramientas computacionales que permitan incorporar todas estas variables en el proceso de planificación de Corto Plazo, obliga a los planificadores a utilizar métodos de aproximación manual, de prueba y error, aplicando sustanciales esfuerzos para generar planes de Corto Plazo que satisfagan todas las necesidades y que se ajusten a los lineamientos del Largo Plazo.

El siguiente trabajo de título presenta la validación de la herramienta de optimización BOS² en el área de Planificación Minera del Corto y Mediano Plazo en Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC) de BHP Billiton.

BOS² fue desarrollado por Delphos, laboratorio de Planificación Minera de la Universidad de Chile. Es un software de optimización, cuya función objetivo es la maximización de cobre fino. Para ello BOS² integra la variabilidad mineralógica del yacimiento, que constituye el principal desafío en el complejo proceso de planificación en CMCC.

La validación es realizada por medio de pruebas o corridas numéricas, llevadas a cabo por la plataforma Virtual Mining Machine (VMM) desarrollada por Cube Mine, empresa constituida a partir del laboratorio Delphos. Las pruebas de validación replican el plan Budget de Mediano Plazo, para el año fiscal 2013 y 2014 realizado por CMCC, a fin de obtener comparaciones en los finos de cobre entregados con ambas metodologías. Las pruebas de optimización se realizaron durante los meses de Abril a Julio del presente año.

Los resultados observados en la primera etapa de validación, dan cuenta sólo de un 83% del compromiso de los finos de cobre del plan CMCC. A partir de estos hallazgos se identificaron oportunidades de mejoras técnicas para la aplicación del modelo en base a la liberación de restricciones. En efecto, al tomar la decisión de liberar la restricción de distancias entre fases contiguas, se alcanza un 97% de los finos estipulados en el plan CMCC, dando cuenta preliminarmente de la validez de esta herramienta en el proceso de planificación. Los resultados más relevantes del estudio se presentan en la siguiente tabla comparativa:

	Plan CMCC	Validación 1	Validación 2
Material Procesado [Kton]	39,995	36,286	39,881
Finos de Cobre [Kton]	448	373	437
Remanejo [Kton]	4,713	4,567	3,444

Tabla 1. Resultados plan CMCC, Validación 1, Validación 2.

Tal como se mencionó la validación 1 corresponde a la primera corrida numérica del modelo de optimización, mientras que la validación 2 corresponde al modelo con decisiones de mejoras técnicas, en las que se evidencia un aumento en los finos de cobre y mayor coherencia con el plan de CMCC, al mismo tiempo la disminución de un 27% en el remanejo de materiales indica un potencial de beneficio para el negocio.

ABSTRACT

Currently mining industry faces complex and challenging processes of short and medium term planning, declining trend in average ore grades, increasing mining operational costs, greater selectivity and increasing blending ore, are the new limiting to aim a certain production.

The lack of computational tools that can incorporate all of these variables in the process of short-term planning, forces planners to use manual approximation methods, trial and error, applying substantial efforts to generate short-term plans that meet all needs and which comply the guidelines of the Long Term.

This work presents the validation of the optimization tool BOS² in Mine Planning area of Short and Medium Term Cerro Colorado Mining Company (CMCC) of BHP Billiton.

BOS² was developed by Delphos, Mine Planning Laboratory of the University of Chile. It is an optimization software, whose objective function is the maximization of copper. This integrates BOS² mineralogical variability of the deposit, which is the main challenge in the complex process of planning in CMCC.

Validation is conducted by testing or numerical runs, carried out by the Virtual Mining Machine platform (VMM) developed by Cube Mine, a company formed from Delphos laboratory. Validation tests replicate the Medium Term Budget plan for fiscal 2013 and 2014 made by CMCC, to obtain comparisons on copper delivered with both methodologies. Optimization tests were conducted during the months of April to July of this year.

The results observed in the first stage of validation, account only for 83% of the commitment of copper by CMCC plan. From these findings we identified opportunities to implement technical improvements of the model based on the release of restrictions. Indeed, the decision to release the restriction of distances between adjacent phases is achieved by 97% of the fine stipulated in the CMCC plan, giving preliminary consideration of the validity of this tool in the planning process. The results of the study are presented below:

	CMCC Plan	Validation 1	Validation 2
Processed Ore[Kton]	39,995	36,286	39,881
Fine Copper [Kton]	448	373	437
RE-handling [Kton]	4,713	4,567	3,444

Tabla 2. Results CMCC plan, Validation 1, Validation 2.

As mentioned validation 1 corresponds to the first numerical optimization model, whereas validation model 2 corresponds to the decisions of technical improvements, in which evidence an increase in the fine copper and consistency with the plan CMCC, while a 27% decrease in re-handling material indicates a potential benefit to the business.

AGRADECIMIENTOS

A mis pilares fundamentales en este y todos los proyectos que he emprendido, mis padres, Patricia y Juan Manuel, infinitas gracias por el apoyo, sus desvelos, los consejos y estar siempre conmigo en las buenas y en las malas. A mi hermanita Francisca que en estos 7 años ha cambiado nuestras vidas con su alegría e inocencia, muchas gracias por tu incondicional amor mi bebé.

A mis amigas de la danza, la familia que me acompañó durante todo el proceso de Universidad, realizando la pasión que más nos llena en esta vida “La Danza Árabe”, que siempre tuvieron una inmensa paciencia conmigo, gracias Geraldyne, Hanny, Cintia y mis queridas pasionitas, por las alegrías, penas, locuras, bailes e inolvidables momentos vividos.

A mis amigos y compañeros de Universidad Francisco y Felipe sin duda ustedes hicieron de este periodo una de las mejores etapas de mi vida, son unas tremendas personas, estoy inmensamente agradecida de tenerlos conmigo, y por supuesto mi querida Chabe, jamás olvidaré todos los desvelos, trabajos, “comidas”, controles, clases, risas y más risas que vivimos estos últimos cuatro años.

A Esteban, por toda la ayuda y paciencia, te convertiste en mi gran apoyo y compañero, espero tenerte a mi lado por muchos años más.

Finalmente quiero agradecer a toda el área de Planificación Mina de Compañía Minera Cerro Colorado, muchas gracias por la buena disposición, por la ayuda y los consejos, a Marcelo mi profesor guía y a los ingenieros de REDCO, todos han sido de gran ayuda para llevar este trabajo de título adelante.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Motivación del trabajo	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Alcances	4
2. Antecedentes	5
2.1. Planificación Minera.....	5
2.2. Tipos de planificación	6
2.2.1. Planificación Estratégica.....	6
2.2.2. Planificación Conceptual.....	6
2.2.3. Planificación Operativa.....	6
2.3. Horizontes de planificación.....	7
2.3.1. Planificación Largo Plazo	7
2.3.2. Planificación Mediano Plazo	7
2.3.3. Planificación Corto Plazo	8
2.4. Planificación minera a cielo abierto	9
2.4.1. Determinación del pit final	9
2.5. Antecedentes generales CMCC	11
2.5.1. Geología.....	12
2.5.2. Planificación Largo Plazo	13
2.5.3. Planificación Mediano Plazo	14
2.5.4. Planificación Corto Plazo	15
2.5.5. Operación Mina.....	16
2.5.6. Metalurgia, Planta de Procesos	16
2.5.7. Geometalurgia	19
2.5.8. Planificación y optimizador actual.....	21
3. Herramienta VMM-BOS2.....	23
3.1. Modelo de optimización para soportar la planificación del corto y mediano plazo..	23
3.1.1. Variables de decisión:	23
3.1.2. Atributos:	24
3.1.3. Restricciones:	24

3.1.4.	Función objetivo:.....	25
3.2.	Heurísticas de resolución.....	25
3.2.1.	Herramienta de agregación.....	25
3.2.2.	Estructura de grafos.....	26
3.2.3.	Modelo de preselección	27
3.2.4.	Algoritmo de resolución	28
3.3.	Plataforma de resolución	29
3.3.1.	Plataforma de resolución VMM.....	29
3.3.2.	Servidor.....	30
3.4.	Datos de entrada al Modelo de Optimización.....	31
3.5.	Caso de estudio Compañía Minera Cerro Colorado	31
3.5.1.	Modelo de recursos	31
3.5.2.	Estadísticas de Fases-Banco involucrados en Plan BudgetFY13.....	32
4.	Metodología	36
4.1.	Corridas de Validación	36
4.1.1.	Modelo Uniperiodo	36
4.1.2.	Modelo Semestral.....	37
4.1.3.	Modelo a 24 Periodos	37
4.2.	Inputs del modelo.....	38
4.2.1.	Red de distribución de materiales	38
4.2.2.	Restricciones Geometalúrgicas	39
4.2.3.	Restricciones de Capacidad de Carguío Budget FY13-14	40
4.2.4.	Restricciones de Capacidad de Procesamiento Budget FY13-14	41
4.2.5.	Stock Base disponibles Budget FY13-14	42
4.2.6.	Definición de accesos fase-banco	42
5.	Resultados obtenidos Modelo BOS ² , plan Budget	44
5.1.	Resultados prueba Un período	44
5.2.	Resultados prueba Semestral.....	47
5.3.	Resultados prueba 24 períodos	50
5.4.	Comparación Plan Budget CMCC.....	53
5.5.	Análisis de variables, mejoras propuestas al modelo	57
5.5.1.	Crear accesos estratégicos a cada fase-banco.....	57
5.5.2.	Aumenta la restricción del mínimo a alimentación a chancado.....	57
5.5.3.	Libera restricción de diferencia de altura entre fases contiguas.....	57
5.5.4.	Se acortan los tiempos de resolución considerablemente.....	57

5.6. Segundos resultados, prueba 24 períodos.....	58
6. Discusión y recomendaciones.....	63
7. Conclusiones.....	64
8. Referencias.....	66
ANEXO A.....	67
ANEXO B.....	68
Anexo C.....	69
Anexo D.....	70
Anexo E.....	71
Anexo F.....	71
Anexo G.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Retroalimentación del Sistema Productivo de las funciones de Planificación.....	5
Figura 2. Mapa Ubicación Compañía Minera Cerro Colorado.....	12
Figura 3. Proceso de Planificación Largo Plazo CMCC.	13
Figura 4. Proceso de Planificación Mediano Plazo CMCC.	15
Figura 5. Diagrama de Flujo Planta 1 y Planta 2. CMCC.	17
Figura 6. Diagrama de Procesos Metalúrgicos CMCC.....	18
Figura 7. Definición de Arcillas.	20
Figura 8. Definición de Tipos de Mineral (Mintype).	20
Figura 9. Definición de UGM.	21
Figura 10. Herramienta de agregación Generada.....	25
Figura 11. Mínimo camino entre 2 MRU.	26
Figura 14. Fases involucradas en el ejercicio de Planificación Budget FY13.	32
Figura 15. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 10.	33
Figura 16. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 11.	34
Figura 17. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 12.1.	34
Figura 18. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 13.	35
Figura 19. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 14.	35
Figura 20. Metodología utilizada para validación.....	36
Figura 21. Red de distribución de materiales CMCC.	39
Figura 22. Fases 2YB FY13-14.....	43
Figura 23. Porcentaje de Materiales contenido en el modelo.....	45
Figura 24. Porcentaje de material contenido en el modelo, por fases.....	45
Figura 25. Vista Isométrica de bloques minados y no minados en modelo Uniperiodo.	46
Figura 26. Alimentación a Chancado por fase, modelo Semestral.	47
Figura 27. Movimiento Mina por fase, modelo Semestral.	48
Figura 28. Restricción de calidades, modelo semestral.	49
Figura 29. Resultados geométricos, secuencia de extracción a cuatro periodos.....	49
Figura 30. Movimiento Mina total, resultados 24 periodos.	50
Figura 31. Alimentación a Chancado por fase, resultados 24 periodos.....	51
Figura 32. Restricciones de Mezcla, modelo 24 periodos.....	52
Figura 33. Resultados geométricos, secuencia de extracción 24 periodos.....	52
Figura 34. Comparación finos de Cu plan CMCC v/s Primer Modelo Optimización.	54
Figura 35. Comparación de Resultados, restricción de óxidos/sulfuros.....	55
Figura 36. Comparación remanejo plan CMCC v/s Optimizador.....	56
Figura 37. Finos de Cu plan CMCC v/s Segundo Modelo Optimización.	59
Figura 38. Movimiento Mina Total, segundos resultados 24 periodos.	60
Figura 39. Alimentación a Chancado, segundos resultados 24 periodos.	60
Figura 40. Comparación remanejo plan CMCC v/s Segunda Optimización.....	61
Figura 41. Resultados geométricos, secuencia de extracción 24 periodos.....	62
Figura 42. Tonelajes y leyes CuT%, CuS% por fase.	67
Figura 43. Restricciones de mezcla, segundo plan optimizador.	71
Figura 44. Restricciones de óxidos y sulfuros, segundo plan optimizador.	72
Figura 45. Comparación modelos de Largo, Mediano, Corto Plazo.	73
Figura 46. Tonelajes y Cus por banco, modelo Budget y Corto Plazo.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados plan CMCC, Validación 1, Validación 2.....	i
Tabla 2. Capacidad de Movimiento Mina expresada en Kton.....	40
Tabla 3. Capacidad de alimentación a chancado total expresada en Kton.....	42
Tabla 4. Stocks base disponibles Budget FY13.....	42
Tabla 5. Resultados Prueba un periodo.....	44
Tabla 6. Estadísticas de mineral enviado a lixiviación en periodos semestrales.....	48
Tabla 7. Detalle alimentación a Chancado en kton y leyes, plan Budget VMM Fy13-14.....	50
Tabla 8. Detalle alimentación a chancado en kton y leyes, plan Budget CMCC FY13-14.....	53
Tabla 9. Comparación leyes y tonelajes plan CMCC/VMM.....	53
Tabla 10. Fases-Banco consideradas en los planes CMCC/VMM.....	54
Tabla 11. Detalle alimentación a Chancado en kton y leyes, segundo plan Budget VMM Fy13-14.....	58
Tabla 12. Comparación leyes y tonelajes plan CMCC v/s Optimizador.....	58
Tabla 13. Fases-Banco consideradas en planes CMCC/VMM.....	59
Tabla 14. Estadísticas y atributos modelo de bloques, Budget FY13-14.....	67
Tabla 15. Estadísticas Kton primer plan BOS2.....	68
Tabla 16. Estadísticas Kton, segundo plan BOS2.....	69
Tabla 17. Estadísticas kton, plan CMCC.....	70
Tabla 18. Comparación Finos de cobre de los tres planes.....	71
Tabla 19. Delta estadística modelo de Mediano/Corto Plazo.....	74

1. INTRODUCCIÓN

La planificación minera es un ejercicio necesario para el mejoramiento del negocio minero, busca transformar el recurso mineral en la mejor opción de negocio productivo para una compañía, la cual se ve materializada en un “plan de producción”, documento que sustenta el financiamiento y la inversión de capital requerida para el desarrollo de un proyecto, determina las reservas existentes y genera una promesa productiva a un costo dado.

La planificación minera se puede separar en tres grandes áreas, largo, mediano y corto plazo, con similares lineamientos y objetivos estratégicos, pero con distintos horizontes de tiempo, que llevan a la utilización de distintas herramientas según los niveles de detalles requeridos, pero al mismo tiempo con un alto nivel de coordinación entre las distintas etapas.

Este documento hará referencia al proceso de Planificación de Mediano-Corto Plazo de Compañía Minera Cerro Colorado, minera a cielo abierto, perteneciente a la empresa Anglo Australiana BHP Billiton, ubicada en la Región de Tarapacá, su faena está en la comuna de Pozo Almonte y sus oficinas en la ciudad de Iquique.

En una operación minera a cielo abierto, la planificación de Mediano-Corto plazo se encarga de dar una secuencia de extracción al mineral en periodos de tiempo anuales, mensuales, semanales y hasta el día a día, con el fin de cumplir con la producción establecida, se fijan ciertas restricciones, retroalimentando la planificación de largo plazo y utilizando información de la operación para lograr los objetivos.

El trabajo realizado en este proceso de memoria, corresponde al desarrollo e implementación del modelo de Optimización BOS², desarrollado en el laboratorio de Planificación Minera Delphos, de la Universidad de Chile. BOS² corresponde a un modelo de programación matemática entera mixta que integra la variabilidad mineralógica del yacimiento y cuya función objetivo es maximizar el cobre fino.

La validación de esta herramienta junto con el desarrollo del modelo de optimización se realizaron durante los meses de Abril a Julio del año 2012, su implementación viene a complementar y mejorar el proceso de planificación realizado actualmente en el área de Planificación Corto-Mediano Plazo de CMCC.

1.1. Motivación del trabajo

La planificación minera en el corto plazo es un ejercicio bastante complejo de llevar a cabo, más aún de manera rápida y eficiente, pues se presentan muchas limitantes a la hora de optimizar el proceso y reflejar los lineamientos fijados en el largo plazo.

En la mayoría de los casos, las minas a cielo abierto son diseñadas para soportar una operación masiva, con altas tasas de producción, para ello la planificación del Largo Plazo decide cuál parte del recurso se extrae y cual no, todo esto en amplios períodos de tiempo, por ende se manejan y comprometen grandes volúmenes del mineral, sin necesidad de incurrir en la problemática de la variabilidad del cuerpo mineralizado, el cual al ser explotado requiere un gran grado de selectividad en su extracción, como debe hacerlo la planificación a horizontes de tiempo más pequeño.

Este es el caso particular de la faena minera a cielo abierto, Cerro Colorado de BHP Billiton, la cual presenta restricciones geometalúrgicas impuestas por el área de procesamiento de minerales, para la óptima recuperación de las reservas existentes, esto debido a la alta variabilidad que presentan los minerales, principalmente en el contenido de arcillas.

Es en este contexto y considerando la falta de herramientas para la planificación en el corto plazo, que este trabajo de título propone la implementación de la herramienta de optimización BOS², diseñada para soportar la planificación del Corto Plazo, incorporando aquellas variables mineralógicas y operacionales que sustentan un proceso óptimo de producción y alimentación a la planta de procesamiento, evitando poner el riesgo las tasas de producción, secuencias, tonelaje de finos y la producción de cátodos, propuestos por la Planificación del Largo plazo como la solución óptima al negocio minero, es decir, que maximiza el VPN.

Este es el resultado final de varios trabajos de títulos anteriores que buscaron metodologías y modelos que sustenten la Planificación minera del Mediano y Corto Plazo, incorporando restricciones operacionales y de mezcla, que toman en consideración la variabilidad mineralógica de un yacimiento, dando una solución óptima y eficiente a la difícil tarea de la planificación corto plazo, evitando los procesos manuales e iterativos.

Esta herramienta de optimización también cubre acontecimientos inesperados en la operación, de riesgo e incertidumbre, siendo un apoyo al planificador de Mediano y Corto Plazo al tener soluciones rápidas de secuenciamiento cuando cambia alguna de las condiciones ya sea en caso favorable o desfavorable. Propone alternativas al plan realizado manualmente, ya que permite contar con varios escenarios al cambiar las condiciones impuestas en el modelo de optimización.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Validar el modelo de optimización BOS² en el área de Planificación Mediano – Corto plazo en CMCC, mediante la plataforma Virtual Mining Machine (VMM) para su posterior implementación, mejorando y facilitando el ejercicio de planificación, al considerar las restricciones de mezclas, tanto de minerales como de calidades, condición principal en el proceso de producción de CMCC.

1.2.2. Objetivos Específicos

Identificar variables claves técnico-económicas en el modelo de planificación, que agreguen valor al área y a la compañía.

Comparar los resultados obtenidos del optimizador con los planes actuales del Mediano plazo de CMCC, mediante finos de cobre.

1.3. Alcances

Los principales alcances de este trabajo de título son:

- Realizar la validación de la herramienta de optimización BOS², desarrollando planes mineros para un horizonte bi-anual (plan Budget).
- Estudiar e identificar variables claves (técnico-económicas) dentro proceso de planificación minera en el mediano-corto plazo de Cerro Colorado.
- Realizar una implementación mejorada del modelo BOS², donde se consideren aquellas variables que signifiquen mejoras al proceso.
- Seguimiento, control y colaboración a REDCO Consultores quienes serán los encargados de brindar soporte a la herramienta de optimización BOS².

2. ANTECEDENTES

2.1. Planificación Minera

La planificación minera es el proceso de Ingeniería de Minas, que busca transformar el recurso mineral disponible en un yacimiento, en el mejor negocio productivo. Define una promesa productiva, la cual debe ser coherente y estar alineada con los objetivos estratégicos del negocio, además ser un documento bancable (Rubio 2011 [1]). Es un ejercicio “integral” incluye varias áreas de la Ingeniería, inclusive otras no relacionadas al rubro, es dinámica, ya que está sujeta al comportamiento operacional y debe cambiar de acuerdo a este análisis. Tenderá a maximizar la renta del negocio minero activando cada una de sus fuentes, integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno.

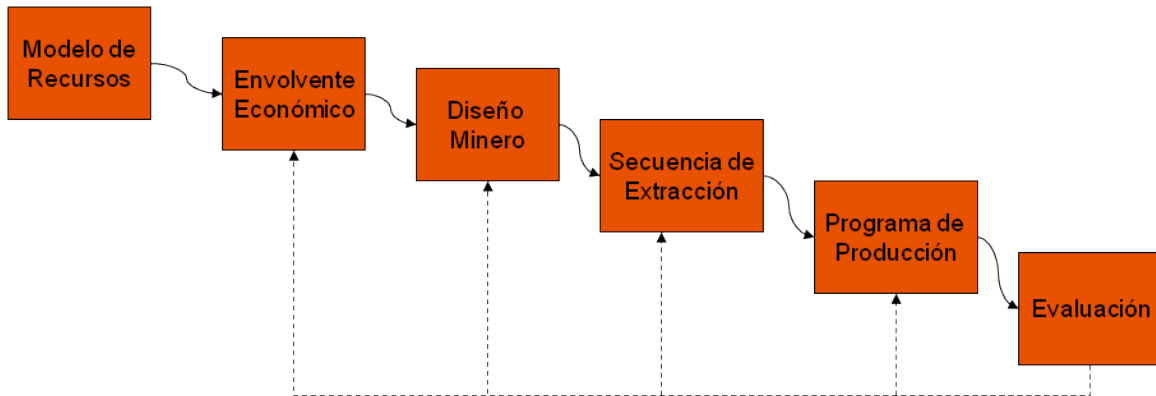


Figura 1. Retroalimentación del Sistema Productivo de las funciones de Planificación.

2.2. Tipos de planificación

Según Rubio (Rubio, E. 2007 [2]) la planificación minera se puede clasificar en tres niveles de procesos.

2.2.1. *Planificación Estratégica*

Su principal objetivo es sincronizar el mercado con los recursos disponibles y la misión del dueño. Existen 5 funciones principales de la planificación estratégica

- Reconocimiento constante del recurso mineral.
- Métodos de extracción.
- Ritmos de explotación.
- Secuencia de producción.
- Leyes de corte.

2.2.2. *Planificación Conceptual*

La planificación conceptual es el proceso que delinea los recursos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la planificación estratégica. Generalmente la planificación conceptual de minas se enmarca dentro de un ámbito de proyecto.

El resultado de la planificación conceptual es el plan minero, representa el plan de negocio de la compañía el qué, cómo y el cuándo se extraerán los recursos en cada uno de los períodos del negocio minero, estableciendo los recursos humanos y materiales a utilizar.

2.2.3. *Planificación Operativa*

Cuando la mina es puesta en operación se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero. En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos y generar los proyectos que permitan alinearse con el plan minero.

El aporte de la planificación operativa al proceso de planificación es fundamental desde el punto de vista de la definición de indicadores operacionales. Es aquí cuando se produce la retroalimentación con la planificación conceptual.

2.3. Horizontes de planificación

Los horizontes de planificación se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero, para aproximarse a la solución es necesario dividir el problema en los siguientes horizontes:

2.3.1. Planificación Largo Plazo

En el caso específico de las operaciones mineras a cielo abierto, la Planificación de Largo Plazo se define como el desarrollo de una secuencia de extracción de materiales dentro del límite final del pit. El objetivo de definir una secuencia es encontrar la que permita lograr de la mejor forma posible los objetivos de producción y estratégicos de la compañía.

Para esto, se definen a grandes rasgos los pasos principales en la creación de un plan de producción en una operación a cielo abierto, los cuales deben ser aplicados de forma secuencial e iterativa, tratando de buscar un plan que sea óptimo de acuerdo a los objetivos planteados (Manual Planificación Spence, 2009 [3]):

- Cálculo de la envolvente económica
- Discretización en fases de extracción dentro de la envolvente – Diseño de rampas de acceso
- Determinación de las tasas y secuencias de extracción – Restricciones de mezcla
- Cálculo de leyes de corte óptimas.
- Selección y cálculo de equipos.
- Evaluación Económica.
- Declaración de reservas formales.

2.3.2. Planificación Mediano Plazo

El horizonte temporal de Planificación en el Mediano Plazo va de 1 a 2 años, la importancia principal es que éste ejercicio compromete el presupuesto de operaciones. Se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo y produce planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas.

El resultado de esta planificación es utilizada para adaptar la definición de negocios de la mina.

2.3.3. *Planificación Corto Plazo*

Se definen los equipos y la logística para cumplir con la meta definida en el presupuesto de operaciones de la mina. En esta instancia de planificación es donde se deben analizar los recursos utilizados en la operación de la mina, sin embargo su rol más importante es la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar a la planificación de mediano plazo.

La planificación corto plazo define indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación del largo plazo, el horizonte de tiempo a planificar comprende el diario, semanal, mensual y trimestral.

2.4. Planificación minera a cielo abierto

Luego de considerar la minería a cielo abierto, como una alternativa económicamente viable, la determinación del pit final y la optimización de un plan de producción se transforman en los análisis preliminares de mayor importancia.

El diseño del pit óptimo juega un papel fundamental durante toda la vida de la mina (Cacceta. L, Hill. S, 2003[4]), en la fase de estudio de factibilidad existe la necesidad de producir un diseño de largo plazo, en las fases operativas, cuando los pits necesitan ser desarrollados para responder a cambios económicos, estructurales, de estimación de reserva, etc., y al fin de la vida útil el diseño del pit final determina el término económico del proyecto.

2.4.1. Determinación del pit final

Para los depósitos explotados total o parcialmente a cielo abierto, existe un diseño límite que viene a maximizar el Valor Presente Neto del proyecto (P L McCarthy [5]).

El pit final de una mina está definido para ser un contorno el cuál es el resultado de la extracción de un volumen de material, suministrando el máximo beneficio y satisfaciendo los requerimientos operacionales. El pit final de la mina da la forma de ésta hasta el fin de su vida útil. Este contorno debe ser finalmente suavizado.

Varios métodos están disponibles para determinar y optimizar este diseño, entre ellos encontramos:

Método Manual

Para realizar el diseño manual, es importante entender la diferencia entre la razón de extracción total del pit y la razón de extracción marginal del último bloque de mineral del banco. Para la optimización en este caso, la tasa de extracción total es irrelevante, pero la razón marginal indica la razón entre el volumen o tonelaje de estéril sobre el volumen de mineral que debe ser movido para tener acceso al nivel (o banco) siguiente.

El diseño del método manual debe estar hecho sobre la base de un gran número de secciones verticales, las cuales, con la razón estéril mineral se puede ver si el conjunto de bloques de mineral son capaces de pagar la extracción de estéril que se encuentra sobre ellos.

Con esto se establecen los límites del pit en una cota, luego se desciende y repite el procedimiento anterior hasta encontrar los límites del pit de la nueva cota. Después se suaviza el pit y finalmente se hace operativo agregando rampas de acceso (Troncoso 2009 [6]).

En caso de alta variación de leyes el problema puede tornarse muy complejo. Este método solo se aproxima al óptimo pero no lo logra.

Método de Conos Flotantes

Este método fue desarrollado por Kennecott Copper Corporation durante los años 60.

La técnica consiste en una rutina que pregunta por la conveniencia de extraer un bloque y su respectiva sobrecarga. Para esto, el algoritmo tradicional se posiciona sobre cada bloque de valor económico positivo del modelo de bloques y genera un cono invertido, donde la superficie lateral del cono representa el ángulo de talud. Si el beneficio neto del cono es mayor o igual que un beneficio deseado dicho cono se extrae, de lo contrario se deja en su lugar.

Existe una versión optimizada de este método por Marc Lemineux la cual obtuvo como resultado diseños muy superiores en el aspecto económico, que aquellos obtenidos con el algoritmo convencional.

Sin embargo entrega resultados inferiores a Lerchs y Grossman ya que en ocasiones entrega resultados erráticos, por lo que se hace importante hacer varias corridas al modelo.

Método de Lerchs Grossmann [7]

Esta fue una técnica matemática la cual fue inutilizada en la práctica hasta la aparición de un práctico programa de optimización llamado Wittle Three-D el cual fue desarrollado por Jeff Whittle. En la actualidad es el programa más utilizado a lo largo del mundo en optimización de pit.

El método bidimensional de Lerchs- Grossman permite diseñar en una sección vertical la geometría del pit que presenta la mayor utilidad neta. En cada sección el resultado es el pit óptimo sin embargo es probable que el pit final no lo sea ya que este es el resultado del suavizamiento.

El método tridimensional representado por Lerchs y Grossman se basó en el método de la teoría de grafos. Tanto el método bidimensional como el tridimensional llegan al mismo resultado.

Los dos métodos son difíciles de programar para un ambiente de producción donde existen grandes cantidades de bloques.

2.5. Antecedentes generales CMCC

Compañía Minera Cerro Colorado está ubicada en la Región de Tarapacá, Chile, sus oficinas en la ciudad de Iquique y su faena en la comuna de Pozo Almonte, Provincia del Tamarugal. Es propiedad de la corporación anglo australiana BHP Billiton y su administración y operación corresponde a la División de Metales Base de BHP Billiton, cuya casa matriz está ubicada en Santiago de Chile.

En Cerro Colorado se explota un yacimiento de cobre a cielo abierto ubicado 120 kilómetros al noreste del puerto de Iquique y a una altura promedio de 2.600 metros sobre el nivel del mar.

La producción es de cátodos de cobre fino de 99,999% de pureza, el que se obtiene mediante los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención.

Los cátodos tienen registro de marca en la Bolsa de Metales de Londres como “Cátodos CMCC” y su proceso de comercialización y venta es realizado por BHP Billiton Marketing. Los cátodos son embarcados en el puerto de Iquique hacia los mercados de China, Italia y Corea del Sur, principalmente.

La inversión acumulada actual del proyecto se estima en 1.153 MUS\$ y considera 16 fases de extracción a cielo abierto, una vida útil de 26 años y una producción anual de 91 mil toneladas de cobre de alta pureza al año. La capacidad actual de extracción mina alcanza los 210.000 tpd, con un máximo de 240.000 tpd, con una alimentación a planta de 52.000 tpd.

En CMCC es necesario alimentar mineral a planta en una mezcla o blending, esto se debe a que el yacimiento presenta una alta variabilidad en la alteración de los minerales, principalmente en el contenido de arcillas. La caracterización del yacimiento indica que el lado Oeste corresponde a una mala calidad de roca (muy alterado) y el lado Este de una buena calidad, adicionalmente el sector central del yacimiento corresponde a un transición entre la mala y buena calidad, por lo que es denominada calidad regular (o moderada).

El depósito está formado por 9 unidades de arcillas, las cuales están presentes en los 3 principales tipos de mineralización factible de ser lixiviada con el proceso actual de CMCC (óxido, sulfuro y mineral hipógeno). No obstante para el manejo de estas unidades en el plan minero, estas fueron tratadas como 3 grandes grupos denominadas “Buenas”, “Regulares” y “Malas”, en concordancia al comportamiento en la cinética de las pilas de lixiviación.

El criterio utilizado para regular la restricción de mezclas es limitar la cantidad de arcillas malas (máximo 50%). La mezcla es el parámetro más relevante para CMCC ya que trasciende desde el largo plazo (secuencia de extracción), mediano, corto plazo y operación día a día.



Figura 2. Mapa Ubicación Compañía Minera Cerro Colorado.

2.5.1. Geología

El yacimiento Cerro Colorado es un depósito tipo pórfido cuprífero y molibdeno, cuya mineralización se asocia a eventos intrusivos conformando unidades complejas de sulfuros primarios de profundidad y eventos de mineralización secundaria que formaron unidades de oxidados y sulfurados supérgenos de Cobre.

Pertenece al cinturón de pórfidos cupríferos del Paleoceno al Eoceno Medio, al igual que los yacimientos de Spence y Lomas Bayas. La mineralización de Cerro Colorado está hospedada en rocas Andesíticas de la formación Cerro Empexa (edad Cretácico), las cuales sobreyacen a rocas sedimentarias y volcánicas de la formación Chacarilla (edad Jurásico), las cuales fueron intruidas por numerosos granitoides durante el Cretácico tardío al Paleógeno. Sobreyaciendo a todas estas unidades, se encuentran las gravas e ignimbritas de la formación Altos del Pica (Bouzari and Clark, 2006 [8]).

Las reservas del yacimiento ascienden a 200,6 millones de toneladas de mineral, con una ley media de 0,706 % de cobre total y 0,432 % de cobre soluble, de las cuales 67% son minerales oxidados, 28% corresponden a sulfuros secundarios y un 5% a MSH.

2.5.2. Planificación Largo Plazo

Para responder a los desafíos que significa abordar de la mejor manera el ciclo de planificación, se utilizan las herramientas más adecuadas en cada etapa de acuerdo a las características propias de la operación de CMCC, de modo tal de entregar un producto con el nivel de detalle y la optimalidad requerida.

El diagrama siguiente muestra el ciclo de planificación de CMCC para un año Fiscal (desde el mes de Julio a Junio), se identifican las etapas principales en el cálculo los planes mineros asociados.

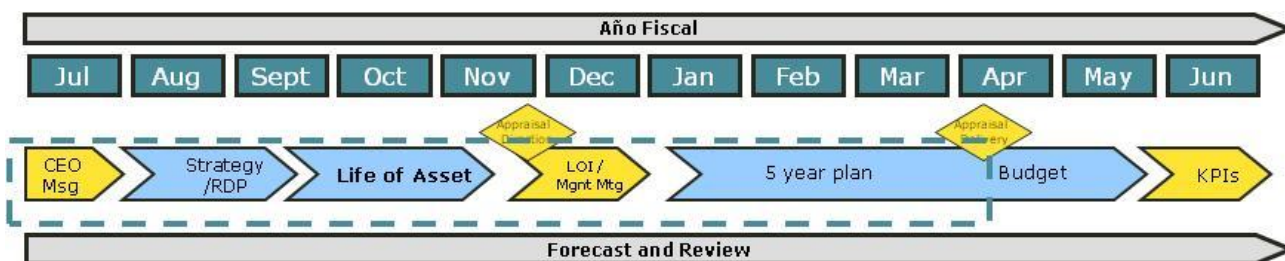


Figura 3. Proceso de Planificación Largo Plazo CMCC.

En el caso de la Planificación Largo Plazo, se encuentran 3 etapas principales definidas a continuación:

Plan de Recursos y Desarrollo (RPD):

El plan RPD explora varias estrategias posibles a seguir a lo largo de la vida de la mina, según los recursos disponibles, desarrolla un gran número de casos

en un tiempo razonable, optimizando la extracción del recurso a lo largo de la vida del asset.

Life of Asset (LOA):

El proceso LoA planifica toda la vida de la mina (asset), requiere un nivel de detalle mayor para generar planes que respondan a supuestos más específicos. Traduce el RDP a planes con un mayor detalle de ingeniería con el fin de asegurar la factibilidad real de la extracción, optimizando y dando un mayor valor.

Plan de 5 años (5YP):

El plan de 5 años se prepara anualmente, con el fin de definir las acciones que se tomaran en el mediano a corto plazo para cumplir con la estrategia acordada en el Strategy Appraisal y el LoA. El plan de 5 años corresponde al punto en donde los objetivos del largo plazo se transforman en acciones realizables de acuerdo a los recursos presentes.

Concretamente, este plan en sus primeros periodos requerirá un alto nivel de detalle para generar planes realizables de acuerdo a la situación actual del asset, pero que se encuentre alineado con las decisiones tomadas en el LoA. En general, no es necesario volver a determinar una envolvente económica, pero la definición de fases puede tener modificaciones en su diseño. En este caso se deben recubrir las reservas y reimportar la información en las herramientas a utilizar.

El plan de 5 años genera una plataforma al plan Budget de 2 años de Mediano Plazo.

2.5.3. Planificación Mediano Plazo

Se observa en el mismo esquema del capítulo 2.5.2, las herramientas utilizadas en el ciclo de planificación para el Mediano Plazo, corresponden a los planes Budget y Forecast.

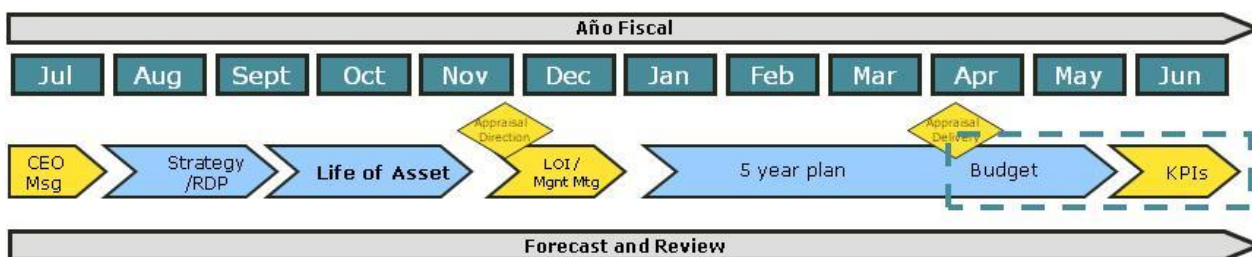


Figura 4. Proceso de Planificación Mediano Plazo CMCC.

Plan de 2 años 2YBudget:

La planificación de mediano plazo se hace cargo del plan bi-anual Budyet, cuya relevancia fundamental corresponde a que compromete el presupuesto de operaciones, aprobar capitales e inversiones menores. Se realiza conforme los lineamiento del Plan de 5 años, establece indicadores claves del negocio para evaluación de desempeño. Tiene un horizonte de tiempo de mensual, es decir se planifica a 24 periodos.

Key Performance Indicators (KPI):

Son los indicadores que miden el rendimiento productivo del negocio, alinean los comportamientos con los objetivos del corto, mediano y largo plazo, crea una plataforma robusta para la evaluación de desempeño

Forecast review:

El plan Forecast de mediano plazo, evalúa las variaciones entre los resultados reales y los planificados, tiene un horizonte de tiempo anual y se realiza cada mes con el fin de asegurar una ejecución disciplinada en los planes. Los tres primeros meses se planifica semanalmente y el resto en periodos mensuales.

2.5.4. Planificación Corto Plazo

La generación del Plan Semanal de corto plazo se realiza actualmente de manera manual utilizando el software de diseño Vulcan, que permite delimitar y cuantificar los volúmenes seleccionados para la extracción día a día por el planificador. El programa semanal de extracción del área Mina está alineado al Plan Forecast del mes, su objetivo es mantener el control y ejecución de las tareas realizadas diariamente en el área de Operaciones Mina.

2.5.5. Operación Mina

La operación del rajo Cerro Colorado a cargo de la Gerencia de Producción, para cumplir con el actual plan minero, dispone de los equipos que a continuación se mencionan para las operaciones unitarias formadas por: perforación, tronadura, carguío, transporte y servicios de apoyo.

Para desempeñar las exigencias del movimiento mina, el carguío cuenta con dos palas (121 y 122) de 43 y 56 yds³ respectivamente, 9 cargadores frontales de 17 m³, 6 para la extracción mina y 3 en los movimientos de los ripios.

Existen dos flotas de transporte, los camiones CAT 789 de 190 toneladas y los 793 de 250 toneladas, con un total de 42 camiones.

Los equipos de perforación son propios de CMCC, se utilizan 4 máquinas perforadoras de percusión con barrenos de diferentes diámetros.

En los equipos de apoyo encontramos 8 Bulldozers, 3 Wheeldozer, 4 Regadores y 4 Motoniveladoras.

2.5.6. Metalurgia, Planta de Procesos

La planta de procesamientos en CMCC cuenta con plantas, a continuación se describe el diagrama general de cada una (Manual de Operación de Proceso CMCC, 2009 [9]):

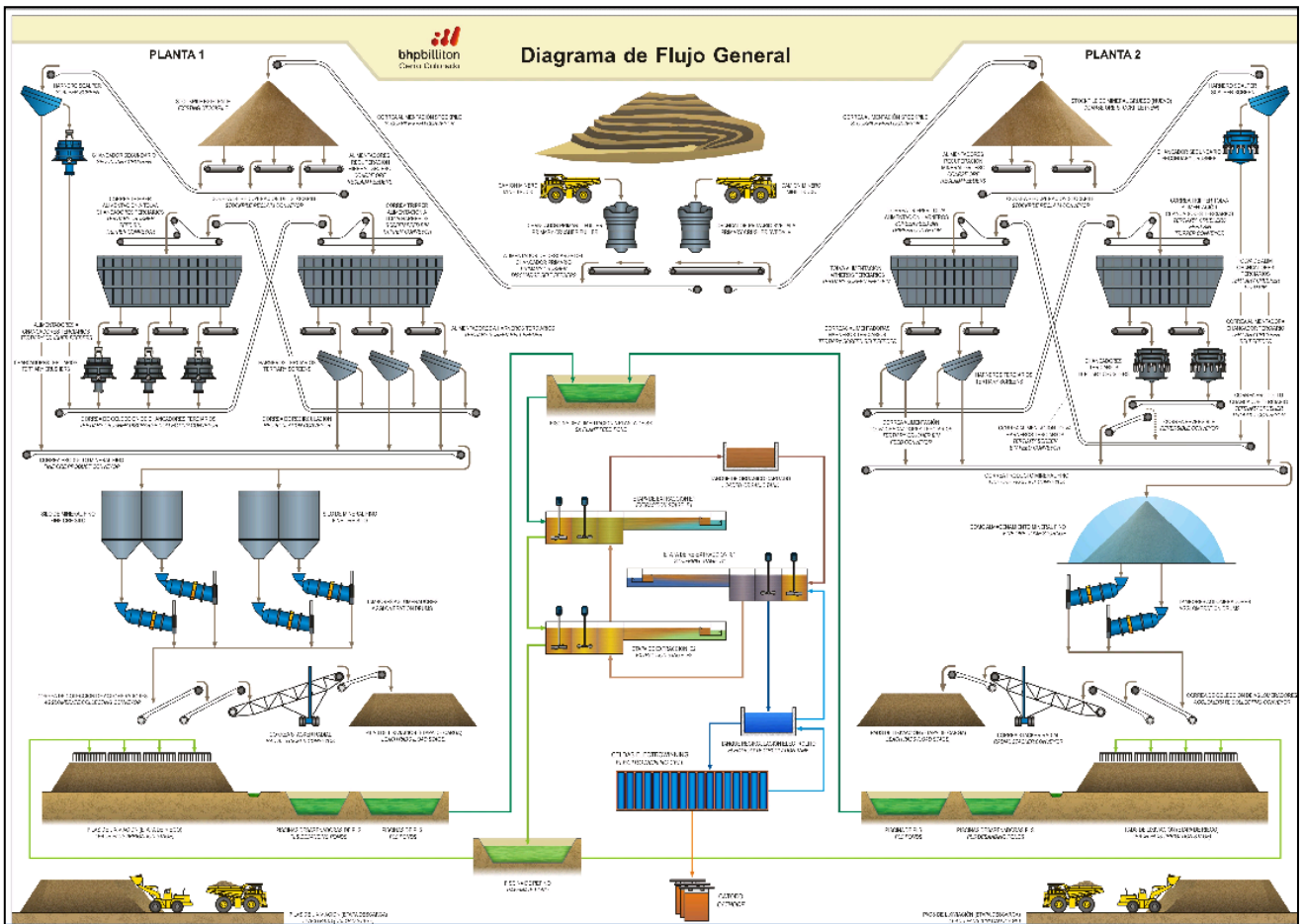


Figura 5. Diagrama de Flujo Planta 1 y Planta 2. CMCC.

Planta 1:

El mineral de mina es descargado en la cámara de descarga del chancador primario por camiones, si hay rocas grandes un pica rocas las quiebra o acomoda, el chancador primario marca Fuller de 42" x 65" reduce el mineral de 1m. a un tamaño menor a 200mm, descargándolo en una tolva de compensación debajo de la cual una correa alimentadora extrae el mineral a razón de 954 t/h.

El sobre tamaño de los harneros con tamaños mayores a 13mm constituye la carga circulante es transportado por la correa 010-CV-05 para descargarlo a razón de 891t/h en la tolva de alimentación a chancadores terciarios de 520t capacidad viva, tres correas alimentadoras se encargan de extraer el mineral y descargarlo en tres chancadores terciarios de cabeza corta AMS hydrocono 3"-84" marca Allis. El producto final de mineral fino es almacenado en dos silos a razón de 1287 t/h. para el proceso de aglomeración y lixiviación de planta 1.

Planta 2:

El chancador primario es de marca Svedala de 54" x 75" reduce el mineral de 1 metro a un tamaño menor a 200 mm, descargándolo en una tolva de compensación debajo de la cual una correa alimentadora extrae el mineral a razón promedio de 2338 t/h.

La tolva de alimentación de harneros terciarios tiene una capacidad viva de 500 t, desde donde es extraído el mineral por dos correas alimentadoras y lo descarga en dos harneros terciarios tipo banana de doble bandeja de 12'x 27' el sobre tamaño recircula a chancado terciario y el bajo tamaño con una granulometría menor a 13mm a razón promedio de 812 t/h descarga en la correa CV11 juntándose con el bajo tamaño del harnero scalper. El producto final de mineral fino es almacenado en el domo de mineral fino a razón de 1421 t/h. para el proceso de aglomeración y lixiviación de planta 2.

El resto de los procesos de Extracción por Solventes, Tank Farm y Electrowinning es común para ambas plantas, como se muestra en el diagrama a continuación.

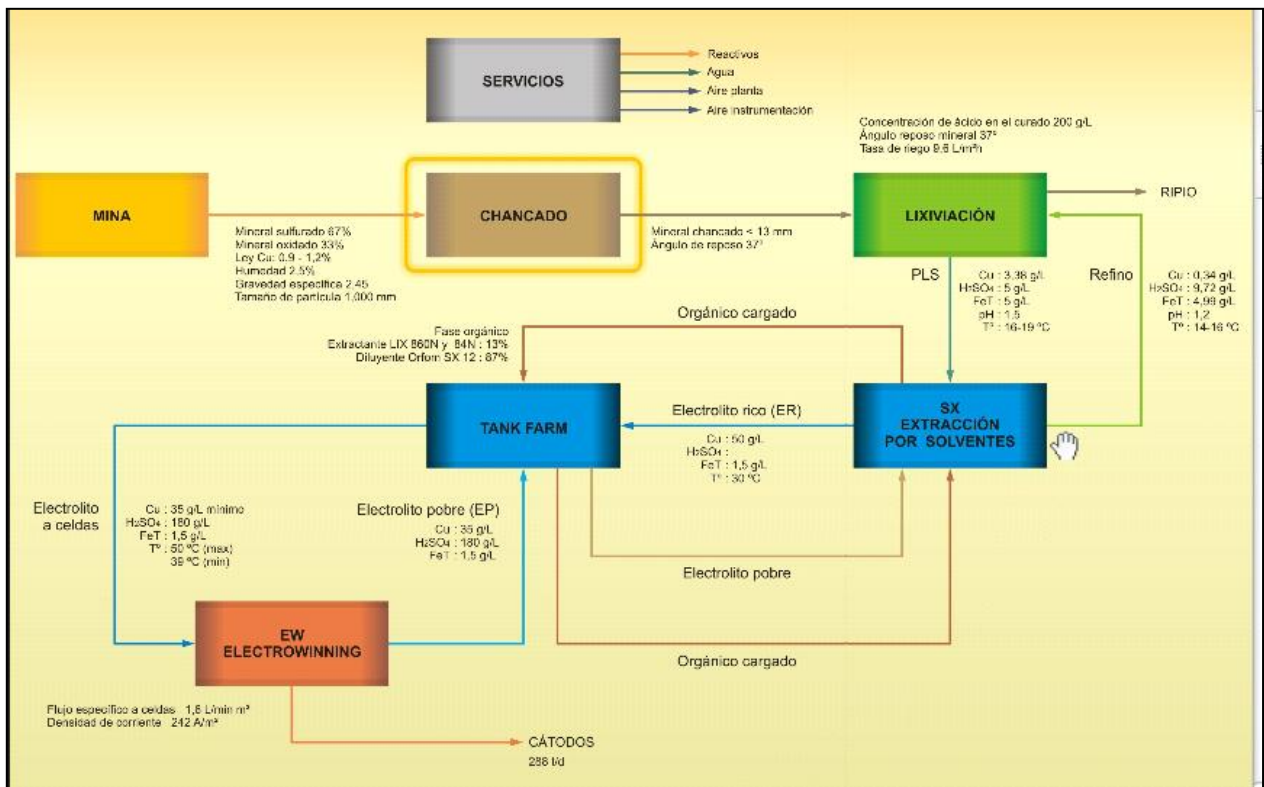


Figura 6. Diagrama de Procesos Metalúrgicos CMCC.

2.5.7. Geometalurgia

La alimentación a planta es una mezcla de minerales óxidos y sulfuros que en gran porcentaje es alimentación directa desde la mina y una cantidad menor desde stock para completar la alimentación a planta requerida, este remanejo de mineral desde stock es variable en el tiempo y depende de las condiciones particulares de cada periodo (Ávila. J, Días, R. Instructivo Cumplimiento de mezcla, 2012 [10]).

Adicional a la extracción neta desde mina, se debe realizar el movimiento de los rípios desde pilas a botaderos. En efecto una vez que las pilas de mineral se encuentran agotadas al final del proceso de lixiviación, se debe extraer el material lixiviado (rípios) para almacenarlo ordenadamente en los botaderos de rípios.

Este mineral debe cumplir con los siguientes requerimientos mínimos:

Razón de solubilidad (RS):

La relación entre CuS/CuT de ser ≥ 0.3 , con un RS ideal de 0.4.

Definición de ARC y calidad de materiales:

Se definen tres tipos de minerales, de Buena, Regular y Mala calidad, en cada categoría se clasifican nueve tipos distintos de arcillas, que se especifica a continuación:

- Mineral de Calidad Mala: corresponde a ARC 1-2-3 y 9(muy malo).
- Mineral de Calidad Regular: corresponde a ARC 4 y 5.
- Mineral de Calidad Buena: corresponde a ARC 6-7 y 8.

Los colores y la nomenclatura se aprecia en la siguiente imagen.

DEFINICIÓN ARCILLA (ARC)				
Nº	C_is50		SUMA ARCILLA	COLOR
	DESDE	HASTA		
1	0.000	0.700	SA > 50%	Malo
2	0.000	0.700	SA < 50%	Malo
3	0.701	1.000	SA > 50%	Malo
4	0.701	1.000	SA < 50%	Regular
5	1.001	1.300	SA > 50%	Regular
6	1.301	1.700	SA < 50%	Regular
7	1.301	1.700	N/C	Bueno
8	>1,70		N/C	Bueno
9	0.000	0.700	Kaol >> Illita	Malo (F9)
-99	No Logeado			

Figura 7. Definición de Arcillas.

Mintype

Los distintos tipos de minerales existentes en la mina se clasifican.

TIPO MINERAL		
Nº	TIPO	COLOR
0	LIXIVIADO LIX	
1	OXIDOS O	
2	SULFUROS S	
3	MSH (MIXTO) MSH	
4	HIPOGENO H	
-99	NO LOGEADO NL	

Figura 8. Definición de Tipos de Mineral (Mintype).

Consideraciones de alimentación a Chancador Primario:

De acuerdo a la planificación de Corto Plazo, se consideran dos escenarios de mezcla de minerales para la alimentación:

- *Mezcla de alimentación de dos tipos de materiales*, donde se mezcla en una proporción de 50/50, considerando 50% de ARC Malo y 50% ARC Bueno y Regular (o solamente ARC Bueno). En el caso de mezclar Mintype Óxido y Sulfuro, se debe generar la mayor alternancia posible entre ellos, si la mezcla sólo considera Mintype Óxido, el requerimiento de alternancia no se considera.
- *Mezcla de alimentación de tres tipos de materiales*, considera en la alimentación tres frentes de carguío, incluyendo en la mezcla ARC Bueno, Regular y Malo (de acuerdo al programa de alimentación) en proporciones variables, incluyendo un máximo de 50% de ARC Malo siendo el 50% restante conformado por ARC Regular y Bueno.

Independiente de los frentes de alimentación que se tengan, existe otra restricción de ARC 9, Muy Malo, no puede superar el 30% de la alimentación Mala.

Unidades Geometalúrgicas.

En Compañía Minera Cerro Colorado existen distintos tipos de unidades geometalúrgicas, que corresponden a los distintos minerales que se manejan en el yacimiento, corresponden a:

Lastre, Óxidos Buenos (OXSI), Óxidos Malos (OXSA), Sulfuros Buenos (SNSI), Sulfuros Malos (SNSA), Mixto Sulfuro Hipógeno (MSH) y mineral Hipógeno (HYP).

La nomenclatura y sus colores se muestran a continuación.

UGM			
Nº	TIPO		COLOR
0	LAST	LAST	BROWN
1	OXSI	OXSI	BRIGHT GREEN
2	OXSA	OXSA	CYAN
3	SNSI	SNSI	BRIGHT RED
4	SNSA	SNSA	BRIGHT YELLOW
5	MSH	MSH	PURPLE
6	HYP	H	PINK
-99	NO LOGEADO	NL	GRAY

Figura 9. Definición de UGM.

2.5.8. Planificación y optimizador actual

Actualmente los planes desarrollados en el área del Mediano Plazo en CMCC, son realizados mediante el software Chronos de la empresa Maptek.

Chronos es un software de planificación, el cual utiliza un archivo de Microsoft Excel® en cuyas hojas de cálculo se puede almacenar, manipular y reportar la información de la mina o sectores de ella con el fin de crear su programación. Este archivo recibe el nombre de Workbook y contiene hojas predefinidas y hojas generales las cuales pueden ser definidas por el usuario. Todas las funcionalidades de las planillas Excel® pueden ser utilizadas como herramientas para la planificación.

Existen 3 tipos de Workbooks que pueden ser creados. La configuración inicial es básicamente la misma y todos incluyen los mismos componentes.

- Planificación Manual – Estas se aplican preferentemente al Mediano y al corto plazo. La planificación es hecha interactivamente seleccionando

objetos gráficos en pantalla o usando la convención de nombres de los bloques de la hoja de reserva.

- **Planificación Optimizada** – Esta planificación es generalmente hecha para soluciones de planificación de largo plazo, aunque tiene también aplicación en corto y mediano plazo. La solución óptima es calculada en función de restricciones mediante programación lineal definiendo una función objetivo para maximizar o minimizar algún valor de variable de interés como leyes, tonelajes o el valor presente neto (NPV por sus siglas en inglés), en dicho caso se deberá ingresar una tasa de actualización del parámetro que se desea optimizar. El motor de la optimización en este tipo de planificación es Cplex.

- **IDS (Diseño Interactivo de Planificación)** – Este tipo de Workbook es generalmente usado para planificaciones a corto plazo. Permite al usuario digitalizar polígonos en pantalla según el banco que se esté trabajando para crear bloques de reservas y planificar los bloques interactivamente. El polígono puede entonces ser modificado y re-planificado con el fin de que tenga un particular valor de tonelaje, ley, etc. Este tipo de workbook no está dentro de los contenidos de este manual.

3. HERRAMIENTA VMM-BOS2

BOS2 es un software de optimización desarrollado por el laboratorio de Planificación Minera Delphos, de la Universidad de Chile. Corresponde a un modelo de programación matemática entera mixta que integra la variabilidad mineralógica del yacimiento y cuya función objetivo es maximizar el cobre fino, permite evaluar múltiples escenarios en la planificación del corto y mediano plazo, por medio de la plataforma VMM.

Proporciona una guía al planificador para realizar una secuencia de extracción operativa con el fin de maximizar la producción de metal.

- Incorpora restricciones operacionales y de mezclas de minerales con diferentes propiedades geometalúrgicas (considera la variabilidad mineralógica de un yacimiento).
- Trabaja con el modelo de bloques, entrega un secuenciamiento del periodo de extracción, periodo de procesamiento y destino al cual es asignado.
- El objetivo es maximizar los finos de Cu.

3.1. Modelo de optimización para soportar la planificación del corto y mediano plazo.

Recibe como input el modelo de bloques con todos sus atributos y una posición espacial definida, que junto con un tonelaje de stocks bien definido caracterizan el volumen total de reservas mineras disponibles (Vargas. M, [11]).

La formulación matemática que permite modelar este problema cuenta con las siguientes componentes: variables de decisión, atributos, restricciones y función objetivo, las que pasan a ser descritas a continuación.

3.1.1. Variables de decisión:

Corresponden a los valores numéricos que se quieren determinar para encontrar el óptimo de la función objetivo explícita en el modelo de optimización. Para el problema de secuencia miento minero estudiado representan las decisiones de minar o no un bloque en un período determinado, y en el caso de hacerlo, la decisión de procesarlo o no, además del tonelaje del stock a procesar en cada período.

3.1.2. Atributos:

Corresponden a las características geometalúrgicas de las reservas mineras, las que en una operación minera están asociadas a dos fuentes:

- Atributos de los bloques: Características del modelo de bloques que permiten clasificar e identificar cada una de las unidades básicas de explotación, estos incluyen; ley de cobre, densidad, destino y valores de atributos geometalúrgicos, tales como ciertos contaminantes.
- Atributos de los stocks: Corresponden a las características asociadas al tonelaje de los distintos tipos de stocks de mineral disponibles para remanejo, estos atributos deben ser coherentes con los correspondientes a los bloques del modelo.

3.1.3. Restricciones:

Las restricciones del modelo permiten caracterizar el problema minero tanto desde el punto de vista de la geometría de explotación como de las capacidades de procesamiento, transporte y concentración de contaminantes factibles de enviar a planta de procesamiento por período. En función de lo anterior podemos agrupar estas restricciones en los siguientes ítems:

- Geométricas: Garantizan la coherencia de la secuencia de extracción de bloques propuesta por la solución del modelo de optimización en términos operacionales, y corresponden fundamentalmente a precedencias verticales o de ángulo de talud y a precedencias horizontales o de conexidad en el avance en la extracción desde las rampas de acceso a una fase-banco
- Capacidad: Representan los límites impuestos por la operación minera en términos del tonelaje que es posible procesar dada la capacidad instalada de la planta y el tonelaje que es posible transportar con los equipos de carguío y transporte disponibles en la mina en cada período.
- Geometalúrgicas: Imponen límites máximos o mínimos para el valor promedio de un atributo geometalúrgico calculado sobre la mezcla de bloques extraídos desde la mina y el material proveniente de los stocks que alimenta la planta de procesamiento en un determinado período de tiempo.

3.1.4. *Función objetivo:*

Para el horizonte temporal en estudio, corresponde a maximizar la cantidad de cobre fino. Esto se justifica porque si bien la planificación de largo plazo típicamente se encarga de maximizar el valor del proyecto, la planificación de corto plazo y mediano plazo apunta al objetivo de satisfacer las metas de producción comprometidas en los contratos adquiridos por la compañía, con límites máximos o mínimos de ciertos constituyentes químicos críticos y tratando de controlar los costos.

3.2. Heurísticas de resolución

Se utilizan con el fin de incrementar la velocidad de cálculo para poder abordar el horizonte temporal de un año de planificación y de representar de mejor manera la operatividad de las soluciones. El tiempo de resolución es proporcional al número de bloques, número de períodos y líneas de procesamiento.

3.2.1. *Herramienta de agregación*

Una forma de disminuir el número de variables a resolver por el modelo de optimización, es tomar grupos de bloques y agregarlos para obtener un modelo final con macro-bloques, bautizados con la sigla MRU, los cuales resultan de agrupar bloques de acuerdo a una función cualquiera definida a conveniencia. Por ejemplo, en el caso de cuerpos mineralizados con alta variabilidad mineralógica, es posible generar macro-bloques por su atributo litología (Figura 10).

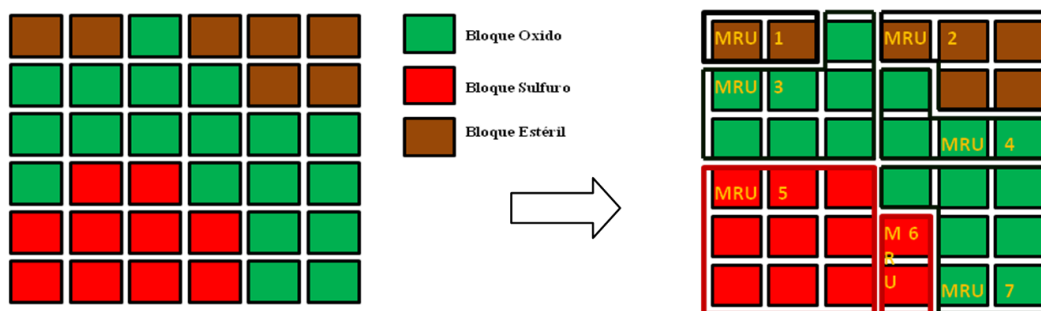


Figura 10. Herramienta de agregación Generada.

Esta metodología de agregación entrega un nuevo modelo de bloques compuesto por un set macro-bloques irregulares, lo que impone la necesidad de implementar una serie de estructuras y herramientas capaces de manipular coherentemente este nuevo modelo, en lo que se refiere a la definición de

precedencias verticales, horizontales y control geométrico de avance en la extracción desde los accesos a cada fase-banco. La respuesta a estas necesidades desencadena importantes mejoras en la resolución del modelo de optimización, tanto en los tiempos de cálculo como a la conectividad geométrica de las soluciones.

3.2.2. Estructura de grafos

Dado en nuevo escenario, es necesario conectar el arreglo espacial de MRU a través de un grafo. El objetivo de la implementación del grafo es ordenar las precedencias verticales y horizontales, de modo de respetar los ángulos de talud y la conectividad geométrica de la solución del optimizador a nivel de un banco. Además permite acotar el espectro de soluciones eliminando variables que pueden conducir a soluciones factibles pero no conexas geoméricamente (Rubio, Vargas, Morales, [12]).

- Precedencias horizontales: impone que una vez que se extrae un bloque o un macro bloque en un período t , se cuenta con T_L períodos como límite para extraer al siguiente en el arco de precedencias horizontales.
- Precedencias verticales: se impone que los bloques precedentes sobre un determinado bloque objetivo deben ser extraídos.

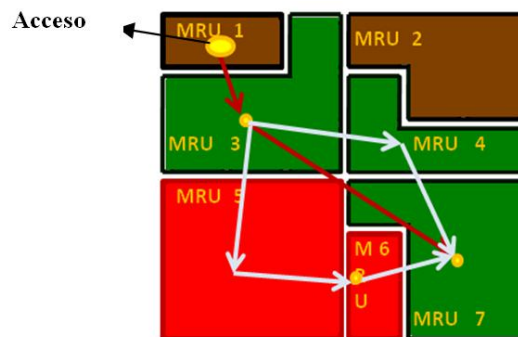


Figura 11. Mínimo camino entre 2 MRU.

A modo de ejemplo, para la Figura 11 si consideramos que la MRU 1 corresponde a un acceso, el camino de distancia mínima desde el acceso hasta la MRU 7 es: MRU 1- MRU 3 - MRU 7, lo que indica que la MRU 7 es precedida por la 3 y la 3 por la 1 respectivamente.

3.2.3. *Modelo de preselección*

Dado el desafío de abordar un mayor horizonte temporal en el ejercicio conjunto de agendamiento y secuenciamiento en la extracción de bloques considerando restricciones geometalúrgicas y operacionales utilizando el modelo descrito en el punto 3.1, surgen fundamentalmente dos problemas que tienen que ver directamente con el número de variables involucradas en el proceso de optimización, el número de períodos y el número de bloques comprendidos en el horizonte temporal. Una primera herramienta desarrollada y descrita en el punto 3.2.1 corresponde a una plataforma de agregación que permite disminuir el número de bloques agrupándolos en unidades de recursos mineros bautizadas como MRU. Sin embargo esta herramienta por sí sola no es suficiente para abordar un horizonte temporal de mediano plazo de una compañía minera del tamaño de Compañía Minera Cerro Colorado (más de 100,000 bloques), por lo que surge la idea de construir un modelo de preselección, el cual tiene como objetivo disminuir el número de bloques objetivo ejecutando una corrida inicial que conserve todas y cada una de las restricciones geometalúrgicas involucradas en el modelo de optimización, pero que se ejecute para un solo período. Este modelo de preselección debe respetar los siguientes ítems:

- Restricciones geometalúrgicas: Impuestas por la planta de procesamiento.
- Capacidades planta y mina: No es posible exceder la capacidad de procesamiento ni la de transporte de todo el horizonte temporal, en particular la última debe saturarse en un determinado porcentaje.
- Coherencia en los destinos: Se conserva la definición de destinos característica del modelo de bloques.
- Restricciones geométricas: Se impone un determinado ángulo de talud y accesos definidos a cada fase-banco. A partir de estos accesos se garantiza la conectividad geométrica de la solución debido a la configuración de grafos implementada.

Esta herramienta de preselección puede ser combinada a conveniencia con la herramienta de agregación para mayor celeridad en los cálculos, y cumple con el objetivo de automatizar el proceso de acotar el universo de bloques objetivo. Su mayor limitante corresponde a la imposibilidad de capturar prioridades en la etapa de pre-stripping, sin embargo este ítem puede ser abordado de todas maneras limitando manualmente el universo de bloques objetivo.

3.2.4. *Algoritmo de resolución*

La técnica de ramificación y acotamiento utilizada para resolver el problema de optimización planteado en esta herramienta, se suele interpretar como un árbol de soluciones, donde cada “rama” conduce a una posible solución posterior a la actual. La característica distintiva de esta técnica con respecto a otras anteriores (y a la que debe su nombre) es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para «podar» esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima. El algoritmo comienza con una relajación del problema y construye un árbol con soluciones enteras particionando el conjunto de soluciones factibles de modo de descartar soluciones fraccionarias. Sin embargo, este solo hecho de descomponer puede conducir a un problema inmanejable por lo que se debe acotar el árbol de manera coherente con la topología del problema.

En principio, con el proceso de ramificación, las ramas finales del árbol tendrán todas las soluciones factibles enteras del problema original. Sin embargo, un nodo del árbol puede no requerir más ramificaciones, en cuyo caso se dice que se acota (poda) esa rama, lo que puede ocurrir porque:

1. El problema en el nodo es infactible por lo que todos los sub-problemas generados a partir de él serán infactibles también.
2. El problema en el nodo tiene un valor óptimo z_1 peor que la mejor solución entera encontrada $z_2 \geq z_1$, por lo que todos los sub-problemas generados a partir de él serán peores.
3. El problema en el nodo tiene una solución entera. Si el valor óptimo z_1 es mejor que la mejor solución encontrada hasta el momento $z_1 \leq z_2$, actualizamos la mejor solución disponible como $z_2 = z_1$

3.3. Plataforma de resolución

Las pruebas de validación del modelo BOS² descritas anteriormente, fueron ejecutadas mediante la plataforma VMM, desde la faena de CMCC en un servidor remoto, facilitado por REDCO Ingeniería, quienes prestaron sus servicios de consultoría en este proyecto.

3.3.1. Plataforma de resolución VMM

Virtual Mining Machine (VMM) es un software desarrollado por Cube Mine, implementado sobre el lenguaje de programación C#, bajo el entorno .NET de Microsoft.

Las bibliotecas que utiliza para la manipulación de los datos y el algoritmo de resolución, respectivamente son biblioteca Cube (manejo de modelo de bloques y agregación de bloques) y BOS2 (generación de modelo de optimización), ambos desarrollados en la Universidad de Chile. Además, utiliza el software de optimización Gurobi Optimization, sobre el cual el modelo de optimización creado por BOS2 es resuelto (método de resolución branch and bound, programación lineal entera-mixta). Virtual Mining Machine cuenta con menús anidados y secuenciales (tipo whittle), que contiene las siguientes etapas:

1. Importación de datos: Se importa desde un archivo de texto, el modelo de bloques disponible para el ejercicio de planificación.
2. Agregación de bloques: Se realiza agregación de bloques a través de geometrías más amplias respetando mineralogías.
3. Precedencias: En este ítem, se setean los parámetros referentes a las precedencias de tipo vertical (conos tipo Lersh and Grossman) y horizontales (radio de vecindad). Además, se entregan coordenadas de bloques demarcados como accesos a fases bancos, con el fin de construir los caminos de extracción dentro de fases bancos, todo esto con el fin de asegurar la congruencia y conexidad geométrica de la operación.
4. Definición de procesos: En este ítem se setea todo lo referente a las etapas que componen las distintas líneas de procesamiento que se dispone en la mina. Cada etapa puede tener asociada un set de restricciones de diferentes tipos (capacidad minado, procesado y blending). Además, se ingresa el horizonte temporal, los stocks disponibles y sus características para alimentar a la planta dentro del horizonte de planificación y se caracteriza el movimiento por fases (restricción capacitaría) de las disponibles para el ejercicio.
5. Líneas de proceso: En este ítem, se componen a partir de las etapas anteriormente definidas, las líneas de procesamiento existentes y disponibles dentro de la mina para procesar mineral. Esto se realiza utilizando modelo de

flujo de redes, es decir, se definen nodos (etapas) y estas se unen a través de arcos, que indican caminos (líneas posibles de procesamiento).

6. Valorización: En este ítem, es posible escoger los parámetros sobre los cuales serán valorizados los bloques de acuerdo a las líneas de procesamiento disponibles. Esta valorización puede ser llevada a cabo mediante recuperación de finos de cobre o mediante valorización por beneficio económico.

7. Secuenciamiento: Una vez montado el modelo de optimización (haber realizado las etapas anteriores), se definen algunos parámetros concernientes a los métodos disponibles para la resolución del modelo. Estos hacen referencia a disminuciones de tiempo en resolver el modelo en contraste con la precisión de la solución (error aceptable de la solución, control geométrico, periodo de ventanas temporales, etc.).

8. Exportación de resultados: Finalmente, una vez que se haya encontrado la solución que cumpla todas las restricciones impuestas, se exporta el modelo de bloques en un archivo CSV con 3 atributos adicionales, los cuales corresponden al tiempo en que se debe minar un bloque (tiempo de minado), tiempo en que debe ser procesado un bloque (tiempo de procesado) y el proceso que debe seguir un bloque (línea de procesamiento que optimiza la función objetivo conjunto).

La interfaz, es de muy fácil uso e intuitiva, con el objetivo de no generar confusión en el seteo del modelo de optimización.

3.3.2. Servidor

Las pruebas de validación CMCC, para el plan bi-anual Budget FY13-FY14, fueron llevadas a cabo utilizando un computador (notebook) de las siguientes características:

- 8 procesadores intel core i7 primera generación 2.13 Hz.
- 8 Gb de memoria RAM.
- Sistema operativo Windows 7 Ultimate, 64 bits.
- Equipo DELL precisión M4500.

3.4. Datos de entrada al Modelo de Optimización.

Modelo de bloques, que contiene la información básica y necesaria para realizar el plan minero. La visualización del modelo de bloques permite identificar el comportamiento de las variables geometalúrgicas dentro de un banco.

Triangulaciones o sólidos (volúmenes de material) de fase-banco disponibles para el período de acuerdo al plan de largo plazo.

Diseño de fase-banco involucradas en el período, con el cual se obtiene la ubicación de la rampa de acceso a cada fase y específicamente el punto de ingreso a cada banco.

KPI (indicadores) mina y planta, para obtener la capacidad de carguío y alimentación a la planta de procesamiento.

3.5. Caso de estudio Compañía Minera Cerro Colorado

Como se mencionó en el capítulo 2.7 la planificación minera en el Mediano y corto Plazo para CMCC está sujeta a una serie de restricciones Operacionales, Geometalúrgicas y de mezcla de minerales. La gran variabilidad del yacimiento torna el problema de la planificación complejo y difícil seguir con los lineamientos y directrices de los planes LOA y 5YP del Largo Plazo.

Para validar la implementación de este nuevo modelo BOS², se construye el plan bi-anual Budget de Mediano Plazo, con un horizonte de tiempo mensual a 24 periodos. Para el Año Fiscal 2013 y 2014 (en adelante FY13-FY14).

3.5.1. Modelo de recursos

El modelo de recursos involucrado en el ejercicio de planificación bi-anual abordado en esta prueba lleva por nombre ING_2yp13.bmf, corresponde al modelo entregado por el área de planificación Largo Plazo para realizar el plan Budget de Mediano Plazo. Cuenta con un total aproximado de 350.000 bloques regulares de tamaño 10x10x10 metros, de los cuales son extraídos 120.000 para el ejercicio de planificación, éstos corresponden a las fases-banco disponibles de acuerdo al plan de largo plazo de CMCC para el Budget 2013.

Para extraer este subconjunto de bloques desde el modelo de recursos completo de Cerro Colorado, se identifican los sólidos correspondientes a las fase banco de interés, luego se marcan los bloques con el porcentaje que se encuentra dentro de alguno de estos sólidos, para finalmente extraer aquellos que están contenidos más de un 50% en alguno de estos, de esta manera no son

considerados en el ejercicio aquellos bloques sobre la superficie, se obtiene así el conjunto de bloques contenidos en los sólidos de interés y de paso se marca cada bloque con su pertenencia a una fase específica.

Cabe destacar que el rebloqueo (o agregación de MRU) descrito en el capítulo 3.2.1 es de 60 metros cuadrados.

Cada bloque perteneciente a las fases involucradas en el ejercicio se pueden visualizar en el programa Vulcan® como muestra la figura 14.

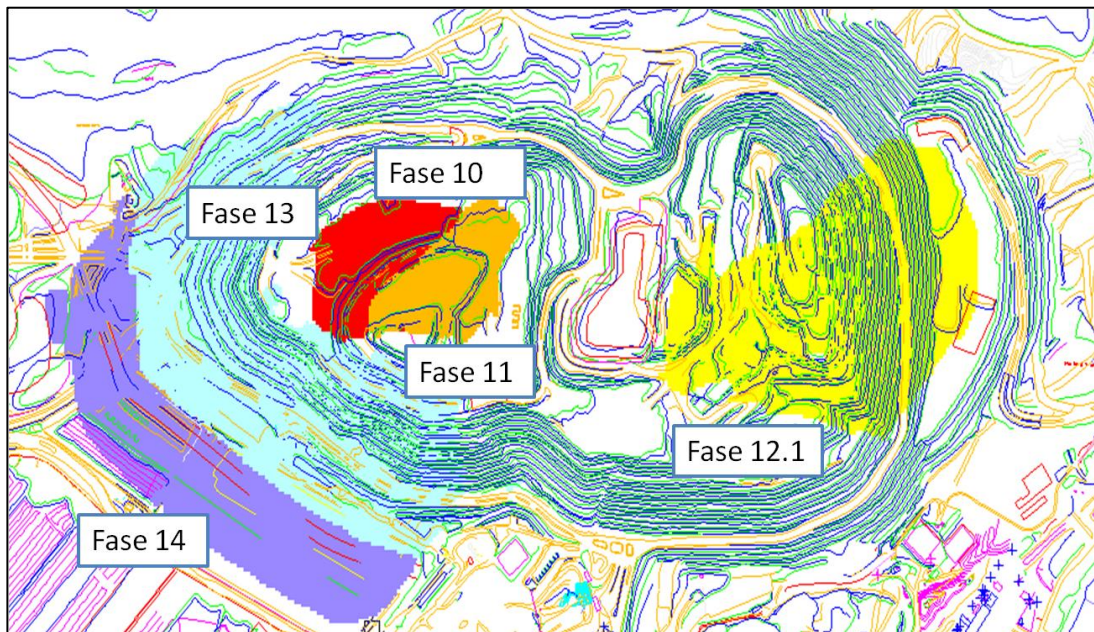


Figura 12. Fases involucradas en el ejercicio de Planificación Budget FY13.

Las estadísticas y principales atributos del modelo de bloques involucrado en el ejercicio de planificación Budget FY13-14 se detallan en anexos A.

3.5.2. Estadísticas de Fases-Banco involucrados en Plan BudgetFY13

Es necesario contar con las estadísticas de los tonelajes, leyes de Cobre Total, Cobre Soluble y razón de solubilidad de cada fase- banco involucrada en ejercicio de planificación, para manejar las cantidades de material que se tratarán en el problema de planificación. Estos materiales son catalogados como lastre, mineral hipógeno y lixiviable (sulfuro- óxido).

El detalle de cada fase- banco se presenta a continuación:

- Fase 10 (bgt_F100.00t): Bancos del 2330 al 2240
- Fase 11 (bgt_F110.00t): Bancos del 2330 al 2290
- Fase 12-1 (bgt_F121.00t): Bancos del 2510 al 2230
- Fase 13 (bgt_F130.00t): Bancos del 2540 al 2320
- Fase 14 (bgt_F140.00t): Bancos del 2560 al 2340

Finalmente los tipos de materiales contenidos en cada fase-banco involucrados en el ejercicio de planificación Budget FY13 son detallados a continuación:

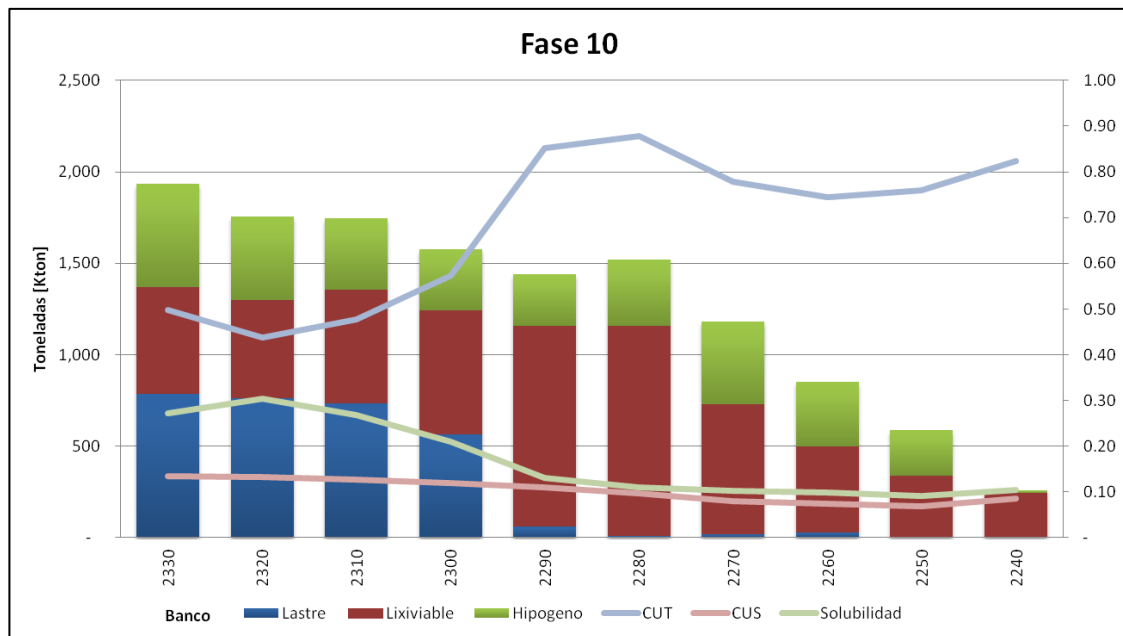


Figura 13. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 10.

Se observa que Fase 10 expone mineral en cada uno de sus bancos, presentando un aumento en la ley de cobre total a medida que se profundiza.

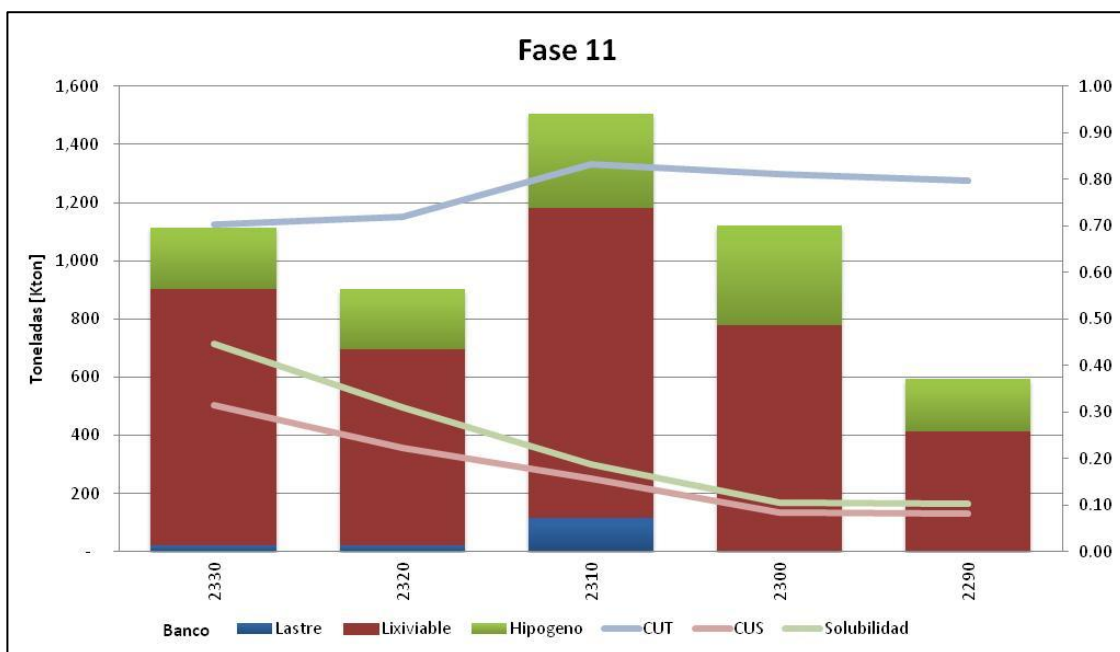


Figura 14. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 11.

Fase 11 presenta una situación similar a Fase 10, pero con tonelajes menores.

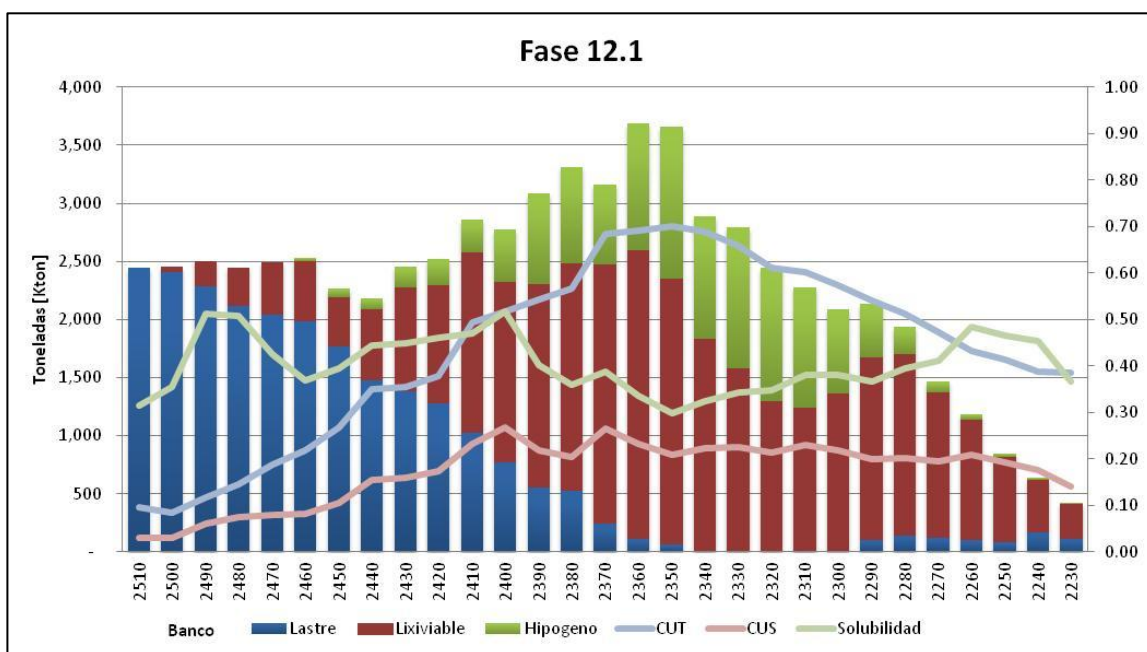


Figura 15. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 12.1.

Fase 12.1 sustenta la gran mayoría del tonelaje a planificar en Budget FY13-14, tiene gran cantidad de lastre en los primeros bancos, para recién exponer mineral en el banco 2490.

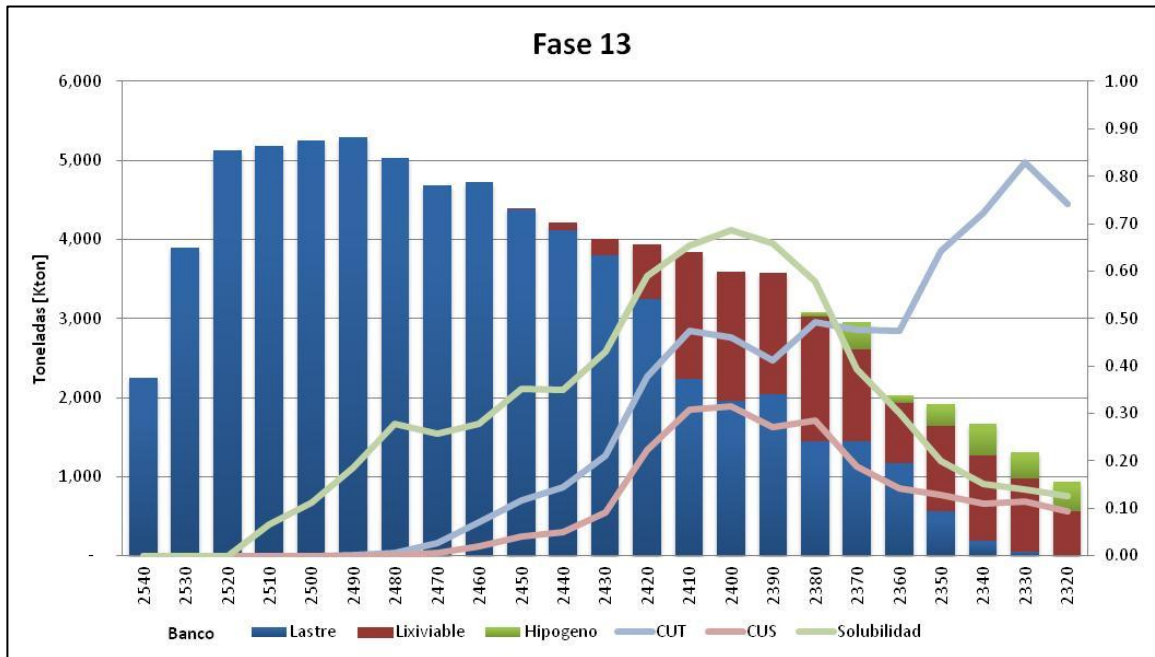


Figura 16. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 13.

Existe una gran proporción de lastre en la mayoría de los bancos involucrados en Fase 13, el mineral se expone al final.

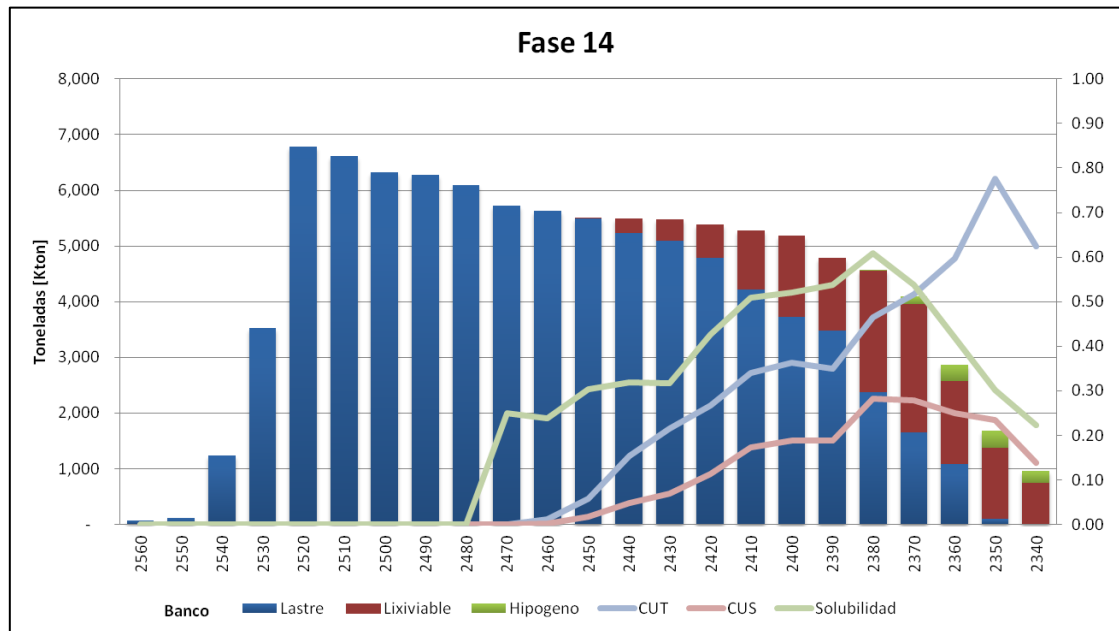


Figura 17. Tipos de Material, leyes y razón de solubilidad Fase 14.

Similar a Fase 13, se presenta gran cantidad de material Lastre en la mayoría de los bancos de Fase 14

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para abordar este problema, consiste en desarrollar 3 modelos de optimización que abarcan desde lo más general al detalle. Se reciben los datos de entrada del modelo, luego se desarrolla un modelo a un periodo, semestral y finalmente a 24 periodos, como indica el siguiente esquema.

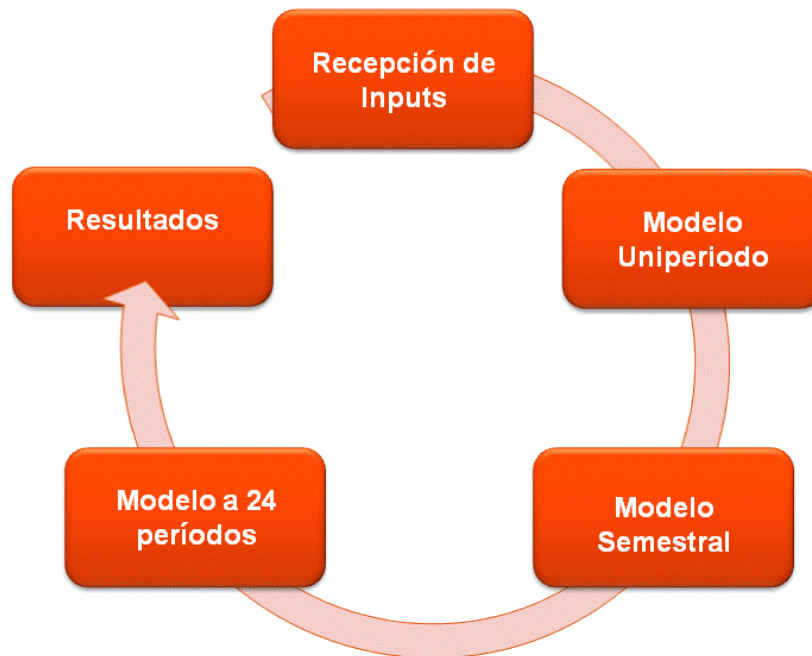


Figura 18. Metodología utilizada para validación.

Las corridas de validación a un periodo, semestral y 24 periodos cumplen con distintos objetivos y alcances dentro de esta metodología, los cuales se verán reflejados en los resultados obtenidos en cada prueba de la validación, son descritos a continuación.

4.1. Corridas de Validación

4.1.1. *Modelo Uniperiodo*

Dado que el horizonte temporal a abordar en este trabajo de título es extenso, para el modelo de optimización en cuestión, se cuenta con un modelo recursos de 120.000 bloques regulares de 10x10x10, por lo que se deben considerar tiempos de resolución significativos para obtener una solución factible (dos semanas aproximadamente). Se procede a desarrollar un modelo de preselección o “Modelo Uniperiodo” con el fin de disminuir el universo de

bloques conservando todas las restricciones geometalúrgicas y de mezcla de minerales involucradas en el modelo de optimización

En esta prueba se validan los sólidos involucrados en el ejercicio, recibidos del Largo Plazo, verificando si en su totalidad cumplen con las restricciones requeridas por el plan, se tiene una estadística de los tonelajes, leyes y razón de solubilidad en cada fase-banco. También es posible contar con los tonelajes que el programa determina enviar a cada red de distribución de materiales determinadas en el capítulo 3.

En esta ocasión se da una holgura del 15% adicional al modelo de bloques y a las restricciones impuestas, para que el modelo de optimización tenga mayores opciones de búsqueda, evitando soluciones infactibles en los modelos siguientes, pero disminuyendo de todas formas el universo de bloques con menores tiempos de resolución.

4.1.2. Modelo Semestral

En el modelo semestral se confirman para cada año las leyes y tonelajes que tendrá cada fase en cada semestre, pero con una idea de temporalidad, modelando el problema y definiendo cuáles de ellas sustentan el plan para el FY13 y FY14. Sin impuestas las restricciones reales definidas, sin proporcionar holgura para encontrar la solución.

Se obtienen 4 períodos de 6 meses cada uno, la finalidad de esta prueba es evitar pérdidas importantes de tiempo para la prueba final de 24 períodos en caso de no cumplir con las restricciones geometalúrgicas impuestas.

4.1.3. Modelo a 24 Periodos

En este último modelo se definen los 24 períodos de un mes para el ejercicio de planificación Budget y se establecen todas las restricciones antes descritas.

La corrida a 24 periodos tiene un tiempo de resolución aproximado de 7 días, en caso de no encontrar solución factible en alguno de los periodos, las soluciones resueltas hasta el momento se van guardando con el fin de realizar análisis y mejoras.

4.2. Inputs del modelo

Se reciben los datos de entrada del modelo especificados en el capítulo 3.3 desde el área Planificación Largo Plazo, para realizar el ejercicio de planificación Budget 2013-2014, el modelo de recursos actualizado a Febrero de 2012 es filtrado según las triangulaciones base del plan de 5 años de CMCC FY2013.

Las tres pruebas de validación descritas anteriormente reciben los mismos datos de entrada en el desarrollo de cada modelo de validación. A continuación se describe de manera detallada su elaboración.

4.2.1. Red de distribución de materiales

El primer paso para abordar las pruebas de optimización con la herramienta BOS2, es identificar y definir los destinos a los cuales son enviadas las reservas extraídas de CMCC, los cuales deben ser ingresados a la plataforma como “líneas de procesamiento”.

El material puede ser enviado a cuatro destinos diferentes, el primero de ellos corresponde al botadero, donde se deposita el mineral catalogado como lastre, el segundo corresponde al mineral reducido de tamaño en una etapa de chancado para luego ser tratado mediante un proceso de lixiviación. El tercer lugar donde puede ser dispuesto el mineral corresponde al stock de minerales hipógenos, y finalmente, el último destino posible para el mineral corresponde al stock de materiales disponibles para alimentar posteriormente la etapa de chancado. A continuación, se presenta un esquema simplificado del manejo de materiales:

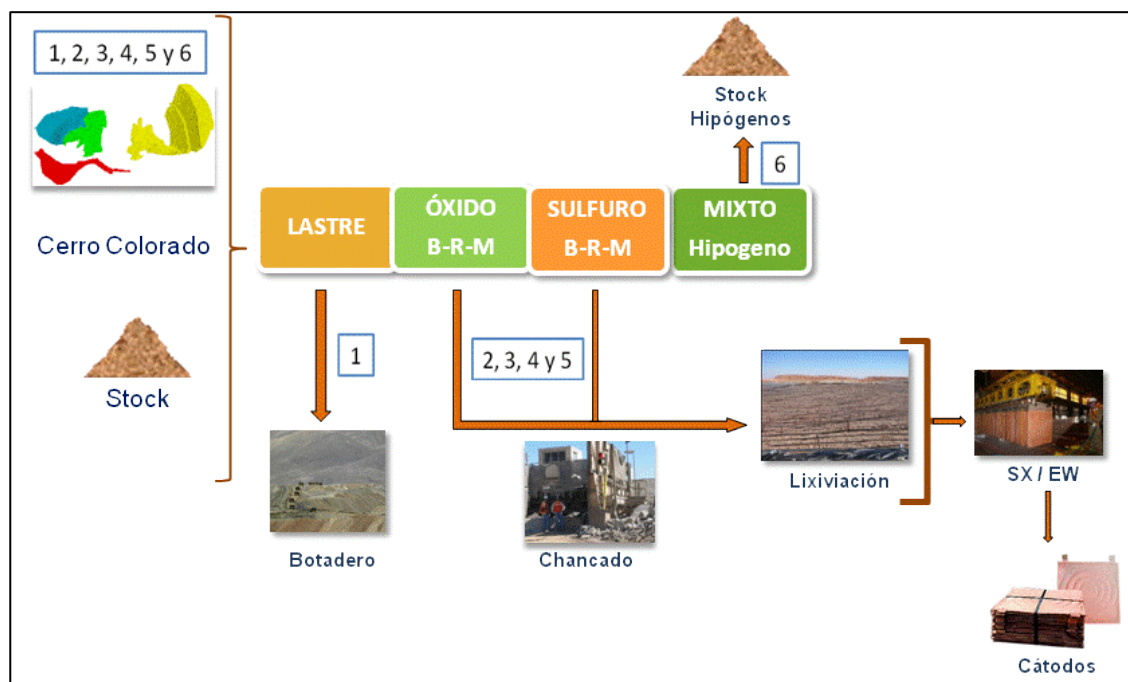


Figura 19. Red de distribución de materiales CMCC.

4.2.2. Restricciones Geometalúrgicas

La planta de procesamiento impone ciertas restricciones geometalúrgica para poder obtener como resultado final el cátodo de cobre con la máxima recuperación, garantizando de paso máxima eficiencia en el proceso. Estas restricciones y las ecuaciones que las caracterizan son detalladas a continuación:

- Mezclas de óxidos y sulfuros no debe contener más de un 50% de sulfuros:

$$\sum (\text{Sulfuros}_{\text{buenos-regulares}} + \text{Sulfuros}_{\text{malos}}) \leq 0.5 \cdot \text{Material Total Procesado}$$

- Razón de solubilidad debe encontrarse en rangos entre 0.4 y 0.7:

$$0.4 \leq \text{Razon de Solubilidad} \leq 0.7$$

- Mezcla de materiales "buenos" y "malos" (calidades de arcillas) no debe contener más de un 50% de material "malo":

$$\sum (\text{Oxidos}_{\text{malos}} + \text{Sulfuros}_{\text{malos}}) \leq 0.5 \cdot \text{Material Total Procesado}$$

- Materiales malos procesados no deben contener más de un 30% de ARC 1 y 9 catalogados como “muy malos”:

$$\sum (\text{Oxidos}_{\text{muy malos}} + \text{Sulfuros}_{\text{muy malos}}) \leq 0.3 \cdot \text{Material malo procesado}$$

4.2.3. Restricciones de Capacidad de Carguío Budget FY13-14

En el capítulo 2.7 se especificó el número de equipos disponibles en la operación de CMCC para la operación de carguío, de esta capacidad se obtiene el movimiento mina total a realizar durante el año fiscal 2013 y 2014. Este dato de entrada es entregado mediante los KPI del área de Mantenimiento Mina, la cual se compromete a entregar cierta cantidad de equipos disponibles en cada período.

La distribución de estos equipos en las distintas fases en explotación durante el Budegt FY13-14, determina la capacidad de movimiento máximo de material para cada mes o semana dependiendo del nivel de detalle que se requiera.

La capacidad de movimiento específica por equipos de carguío disponibles en CMCC para el plan Budget 2013-2014, se expone a continuación:

	FY13											
	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Pala 121	1,455	816	1,501	1,581	1,405	1,699	1,643	1,386	-	1,391	1,353	1,377
Pala 122 y 123 (Diciembre)	1,602	1,969	1,893	1,959	1,662	1,805	1,983	1,849	2,143	1,968	2,000	1,869
Cargador 994	2,878	3,412	3,306	3,258	3,575	3,541	3,863	3,039	4,333	4,382	4,131	3,891
Total	5,935	6,197	6,701	6,798	6,642	7,046	7,489	6,273	6,477	7,741	7,483	7,137
	FY14											
	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Pala 121	1,567	955	1,516	1,567	1,387	1,567	1,516	1,248	1,465	1,516	1,567	1,516
Pala 122 y 123 (Diciembre)	2,100	2,075	2,032	2,100	2,009	1,849	2,032	1,808	2,100	2,032	2,075	2,032
Cargador 994	3,443	4,335	3,606	3,380	3,147	3,354	3,835	3,657	4,162	3,737	4,190	4,007
Total	7,110	7,366	7,154	7,046	6,543	6,770	7,384	6,713	7,727	7,286	7,832	7,556

Tabla 3. Capacidad de Movimiento Mina expresada en Kton.

Para el cálculo de movimiento mina se tienen las siguientes consideraciones:

- Se considera una capacidad máxima de carguío de 2 palas (121 y 122) y un cargador y medio, para cada fase.
- Fase 12.1 opera con pala 121 y 122 desde Julio hasta Diciembre FY13. En algunos periodos se puede agregar uno o dos cargadores.
- Pala 122 se cambia por para 123 en Diciembre de 2011.

La capacidad de carguío para cada fase actúa como una restricción para la herramienta BOS2 y puede ser modificada cuantas veces se desee para evaluar distintos planes asociados a distintas estrategias de posicionamiento de equipos a lo largo del plan en ejecución. En un ejercicio inicial se recomienda utilizar como límite exclusivo el movimiento mina total, característico de la flota global de equipos de carguío de la faena Cerro Colorado, para definir a partir de este resultado la posición de los equipos de carguío.

En su conjunto, las restricciones al movimiento de materiales por fase determinan el tonelaje total de materiales que es factible tratar en cada periodo, cabe notar que a este volumen se le debe adicionar el remanejo que se realizará periodo a periodo para alimentar al proceso de chancado.

La capacidad de movimiento mina total actúa como una restricción de mínimo movimiento de tonelaje en cada periodo, esto permite garantizar el pre-stripping de las fases que exponen mineral en bancos inferiores que no son incluidos en el ejercicio de planificación abordado por la herramienta BOS2.

4.2.4. Restricciones de Capacidad de Procesamiento Budget FY13-14

Existe una capacidad máxima de chancado para cada mes, la cual es entregada por el área de Planificación Planta, según los requerimientos del área de Metalurgia, la cual debe ser respetada por el optimizador.

La saturación de esta capacidad de chancado se obtiene gracias a que la función objetivo apunta a maximizar el volumen de finos corregidos, presentes en el material enviado a chancado. Al igual que con la restricción de movimiento mina, para saturar la alimentación a chancado se le da un rango de 10% de holgura al optimizador para encontrar una solución factible.

A continuación se muestran los tonelajes de alimentación a la planta de procesos en periodos mensuales para el Budget 2013 y 2014, a este dato de entrada se le ha agregado el 1% del tonelaje original por consideraciones de pérdidas.

		FY13											
		Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Chancado	Kton	1,511	1,533	1,531	1,546	1,510	1,665	1,706	1,519	1,745	1,688	1,745	1,678
		FY14											
		Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Chancado	Kton	1,757	1,725	1,693	1,632	1,688	1,746	1,711	1,561	1,757	1,693	1,727	1,673

Tabla 4. Capacidad de alimentación a chancado total expresada en Kton.

4.2.5. Stock Base disponibles Budget FY13-14

Al inicio del ejercicio de planificación Budget 2013-2014, se cuenta con un total de 4 stockpiles base disponibles, cada uno separado en tipos de minerales óxidos y sulfuros, cuyas características se detallan a continuación.

Stock	Tipo Mineral	Tonelaje [ton]	Cut[%]	CuS[%]	RS
Baja Ley Norte	Óxido	879,081.00	0.24	0.17	0.71
Baja Ley Norte	Sulfuro	606,852	0.69	0.15	0.22
Baja Ley Sur	Óxido	62,653	0.62	0.48	0.77
Baja Ley Sur	Sulfuro	3,783,850	0.64	0.17	0.27
Stock-60	Óxido	19,059,875	0.54	0.41	0.76
Stock-60	Sulfuro	210,419	0.96	0.29	0.30
Santa Valentina	Óxido	12,357	0.94	0.59	0.63
Santa Valentina	Sulfuro	855,240	0.71	0.15	0.21

Tabla 5. Stocks base disponibles Budget FY13.

4.2.6. Definición de accesos fase-banco

Otra restricción necesaria para integrar en el modelo de optimización es definir los accesos a cada fase-banco involucrada en el ejercicio de planificación, necesarias para dar el punto de partida a la secuencia de extracción. Consiste en definir cada coordenada x, y, z en el programa de diseño Vulcan® y luego exportarlos a la plataforma del modelo, para ello es necesario contar con el diseño de la mina en un archivo DXF. Como se nombró en el capítulo 3, se pueden definir más de un acceso, dependiendo la estrategia que se quiera tomar en el desarrollo de cada fase, permitiendo “clavarse” en bancos inferiores.

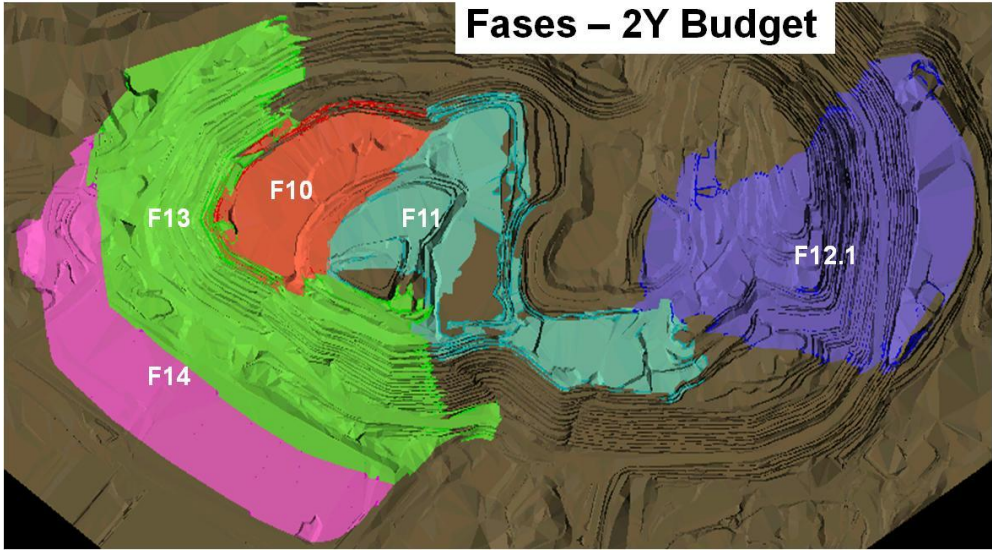


Figura 20. Fases 2YB FY13-14.

5. RESULTADOS OBTENIDOS MODELO BOS², PLAN BUDGET

5.1. Resultados prueba Un período

Como se nombró en el capítulo anterior, el objetivo de la corrida a un periodo es obtener las estadísticas principales de los bloques elegidos por el optimizador para participar en el secuenciamiento del plan a dos años.

A continuación se observan las estadísticas del mineral enviado a los cuatro destinos definidos; lixiviación, lastre, hipógeno y stock de mineral.

Destino	Toneladas [ton]	CUT [%]	CUS [%]	Solubilidad
Botadero	127,516,205	0.07	0.03	0.16
Stock Hipogeno	13,729,903	0.52	0.04	0.07
Stock	3,579,018	0.49	0.11	0.23
Lixiviacion	45,258,520	0.81	0.35	0.45

Tabla 6. Resultados Prueba un periodo.

Se observa que el material lixiviable, que contiene los óxidos y sulfuros de calidades buenas, regulares y malas tiene una razón de solubilidad promedio de 0.45, dentro del rango permitido en la restricción metalúrgica impuesta, esta variable es clave, muy importante respetar a la hora de enviar la alimentación de mineral a la planta de procesos.

El mineral disponible para enviar a lixiviación le da holgura a los 39,740 Kton necesarios para cubrir la alimentación al Chancado durante FY2013 y 2014.

Muy importante para las corridas posteriores, es visualizar los porcentajes de calidades existentes en el bloques seleccionados, ya que se deben respetar las restricciones geometalúrgicas impuestas para Óxidos y Sulfuros Buenos, Regulares y Malos.

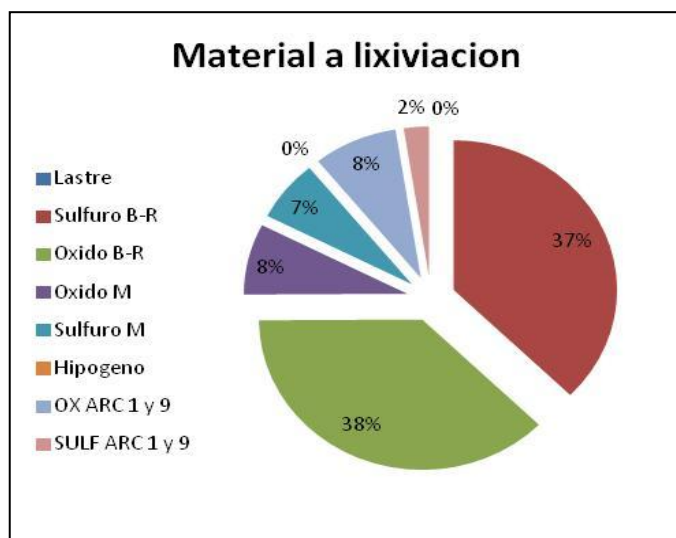


Figura 21. Porcentaje de Materiales contenido en el modelo.

Se puede apreciar que las calidades Malas y Muy Malas, están dentro de los porcentajes permisibles impuestos, la mayoría del material lixiviable corresponde a calidades Buenas y Regulares. Contar con estas estadísticas es una manera de validar la información recibida por el Largo Plazo.

El aporte de cada fase se encuentra en la figura 23, la Fase 121 es la que tiene mayor participación en los procesos de lixiviación, hipógeno y stock, mientras que la fase 130 y 140 son las que presentarán un mayor prestripping (aproximadamente el 90%)

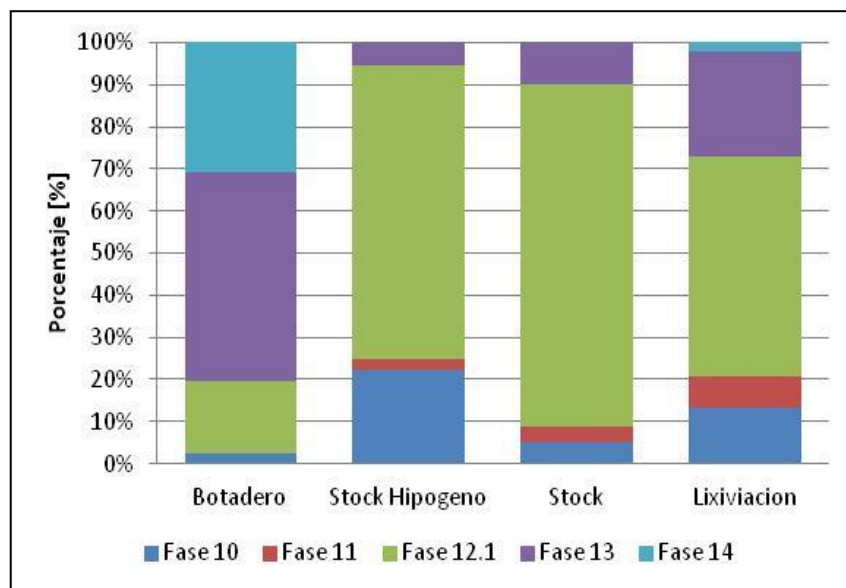


Figura 22. Porcentaje de material contenido en el modelo, por fases.

Finalmente la visualización en el programa de diseño Vulcan®, muestra los bloques que se minan y envían a alguno de los destinos definidos de color rosado, los azules son los que no se extraerán del modelo ING_2yp13.bmf.

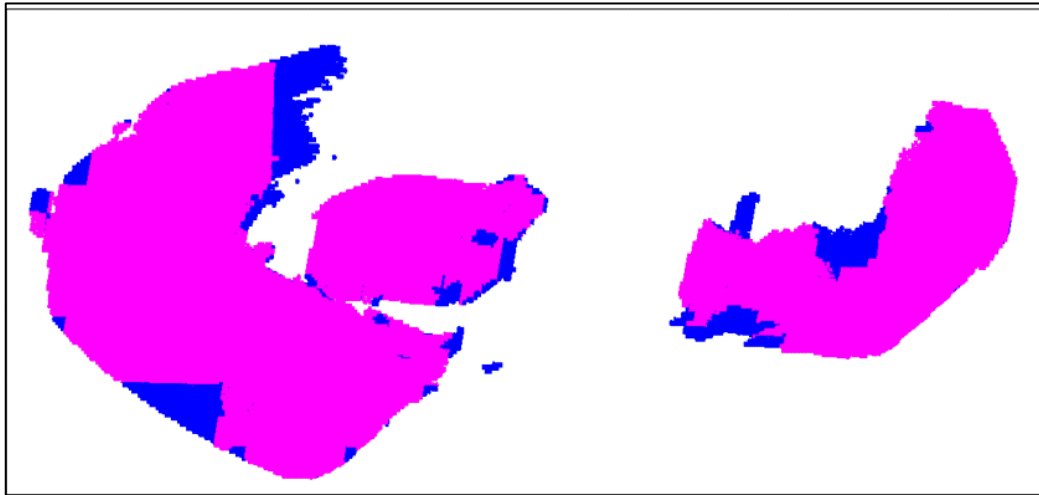


Figura 23. Vista Isométrica de bloques minados y no minados en modelo Uniperiodo.

5.2. Resultados prueba Semestral

El resultado más importante de esta corrida observar la temporalidad que el optimizador comienza a darle a la extracción de cada fase. En este caso las restricciones impuestas son las reales, no tienen algún tipo de holgura extra, por lo tanto al obtener un resultado con el optimizador debe respetar las restricciones establecidas a cabalidad.

Lo más interesante, se observa que la fase 12.2 sustenta el plan el primer año FY2013, tanto en la alimentación a chancado como el movimiento mina total. El año siguiente FY2014 ya se expone el mineral de la fase 130, participando mayoritariamente en la alimentación a la planta de procesos el último semestre.

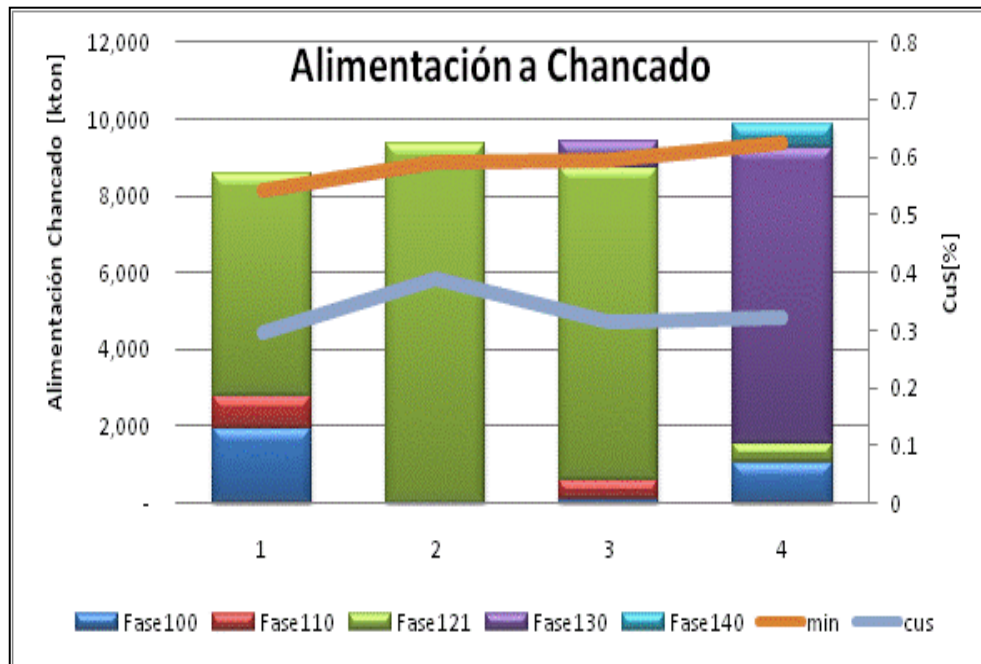


Figura 24. Alimentación a Chancado por fase, modelo Semestral.

Se respetan, tanto para alimentación a chancado, como para el movimiento mina total los rangos de mínimos y máximos establecidos para el optimizador.

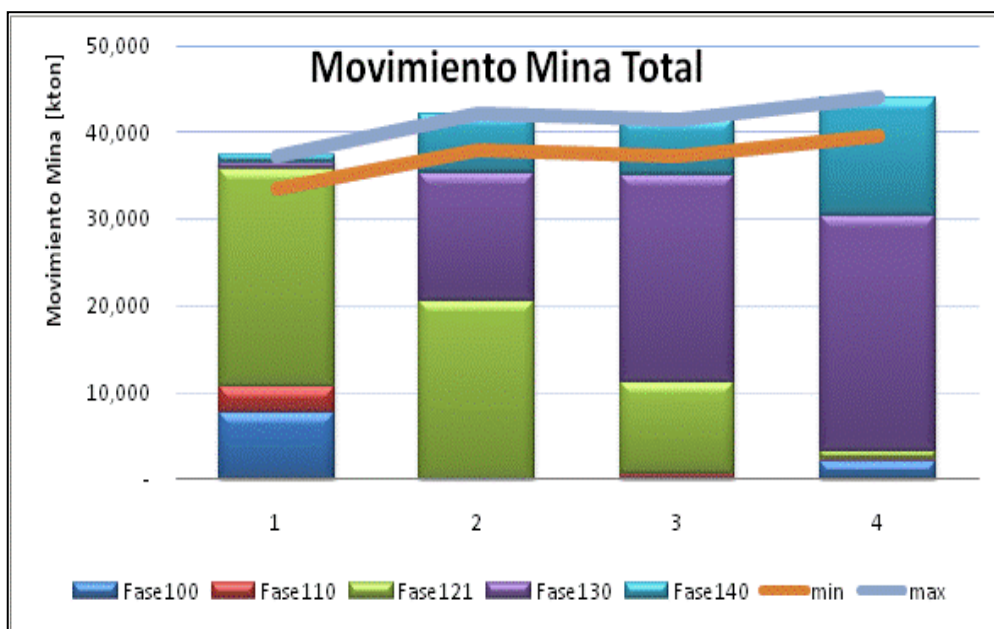


Figura 25. Movimiento Mina por fase, modelo Semestral.

Las estadísticas del mineral que se envía a lixiviación se presentan a continuación, tanto los tonelajes como las razones de solubilidad respetan las restricciones en los 4 periodos semestrales definidos.

Lixiviación				
Periodo	Tonelaje	CuT[%]	CuS[%]	Solubilidad
1	12,082,191	0.79	0.29	0.41
2	10,143,762	0.83	0.37	0.43
3	9,425,944	0.72	0.32	0.45
4	12,161,429	0.77	0.34	0.47

Tabla 7. Estadísticas de mineral enviado a lixiviación en periodos semestrales.

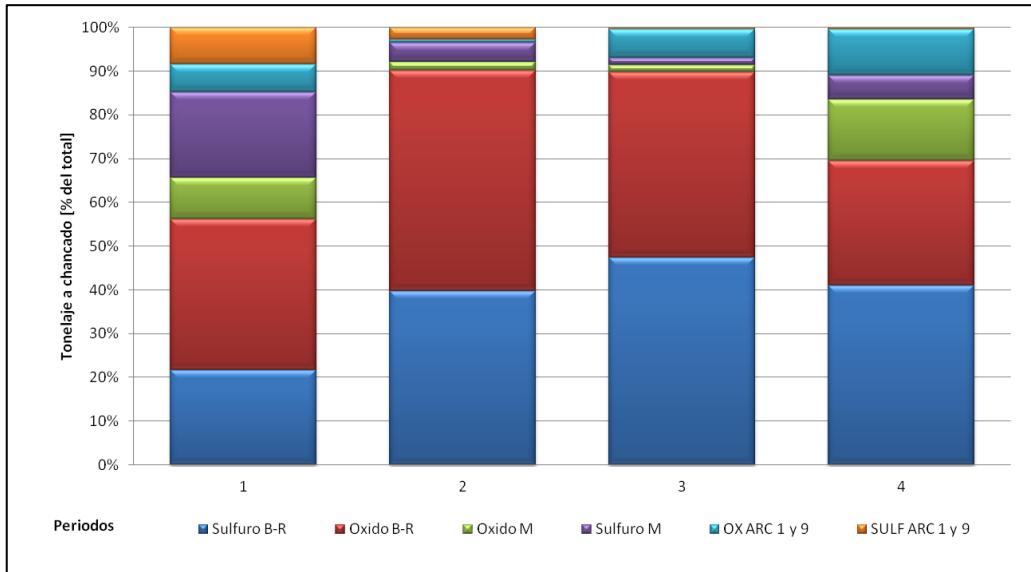


Figura 26. Restricción de calidades, modelo semestral.

La visualización en Vulcan® para la secuencia de extracción en cada semestre se aprecia en la siguiente imagen.

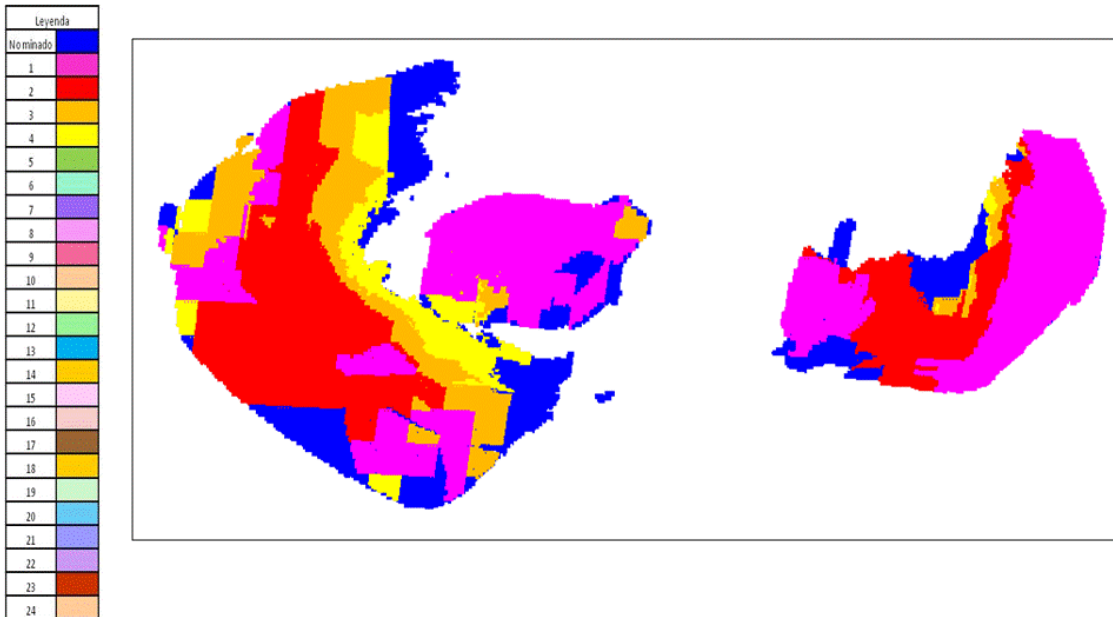


Figura 27. Resultados geométricos, secuencia de extracción a cuatro periodos.

5.3. Resultados prueba 24 períodos

Se observa en el siguiente gráfico que el movimiento mina cumple con el mínimo restringido, correspondiente al 90% del movimiento mina total.

Se aprecia el significativo aporte de Fase 12.1 desde el inicio del plan, también el gran prestripping de Fase 14 en algunos periodos.

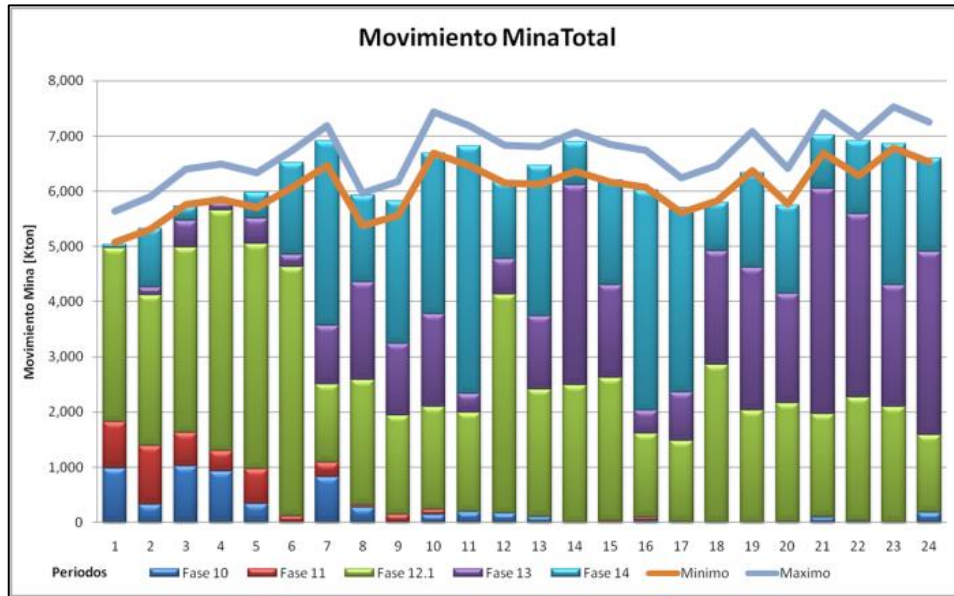


Figura 28. Movimiento Mina total, resultados 24 períodos.

La alimentación a la planta de procesos cumple con el mínimo impuesto en el modelo, 90% de saturación al chancado, exceptuando los periodos 8 y 9, sin embargo sumando el remanejo de mineral, no cumple con el tonelaje total requerido por la planta de procesos.

Alimentación a Chancado FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,360	1,437	1,378	1,397	1,364	1,504	1,537	1,367	1,387	1,513	1,572	1,511
CUT	0.90	0.79	0.73	0.69	0.66	0.65	0.65	0.54	0.65	0.79	0.79	0.45
CUS	0.36	0.36	0.29	0.31	0.28	0.26	0.26	0.22	0.26	0.44	0.37	0.18
RS	0.40	0.46	0.40	0.45	0.42	0.40	0.40	0.40	0.41	0.56	0.47	0.40
Alimentación a Chancado FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,620	1,586	1,659	1,467	1,521	1,607	1,671	1,476	1,621	1,517	1,606	1,609
CUT	0.89	0.84	0.79	0.79	0.68	0.68	0.77	0.73	0.70	0.62	0.64	0.58
CUS	0.44	0.39	0.38	0.39	0.28	0.34	0.33	0.36	0.30	0.28	0.28	0.23
RS	0.50	0.47	0.48	0.50	0.42	0.50	0.43	0.49	0.43	0.44	0.43	0.40

Tabla 8. Detalle alimentación a Chancado en kton y leyes, plan Budget VMM Fy13-14.

Como era de esperar la fase 12.1 sustenta el plan de alimentación a chancado para ambos años, según los resultados de las pruebas semestrales se esperaba una mayor participación de Fase 13 en la alimentación del segundo año, pero esta fue la solución factible que entregó el optimizador.

La ley de cobre total oscila entre 0.54 y 0.92, la de cobre soluble oscila entre 0.24 y 0.44 y la razón de solubilidad entre 0.4 y 0.56.

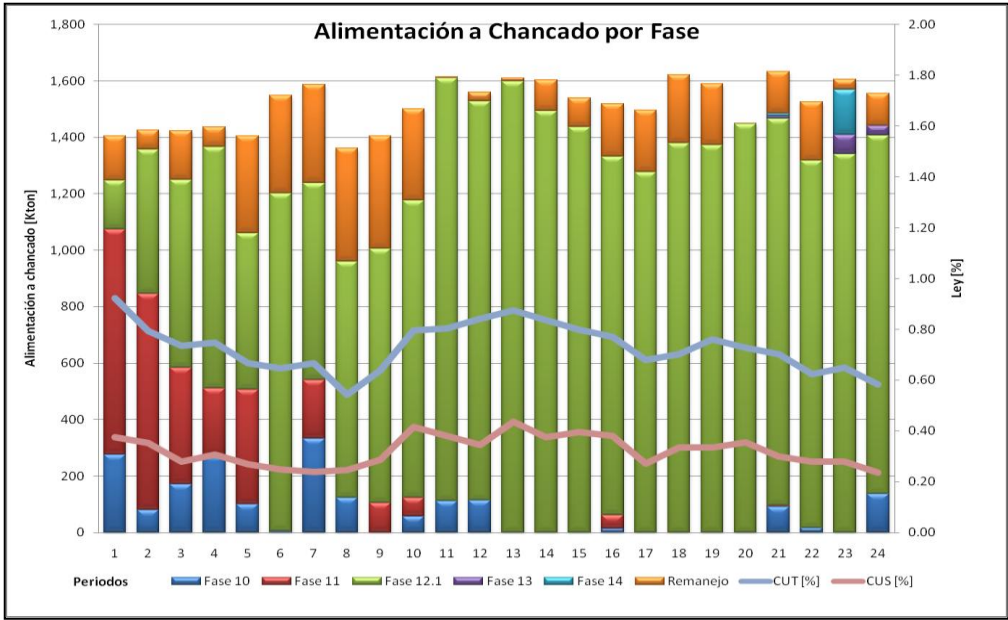


Figura 29. Alimentación a Chancado por fase, resultados 24 periodos.

Las restricciones de calidades Buenas, Regulares, Malas y Muy Malas se cumplen excepto en los periodos 8 y 9, se debe dar una holgura para ajustar condición de material expuesto y alcanzar mayor alimentación en esos dos meses problemáticos.

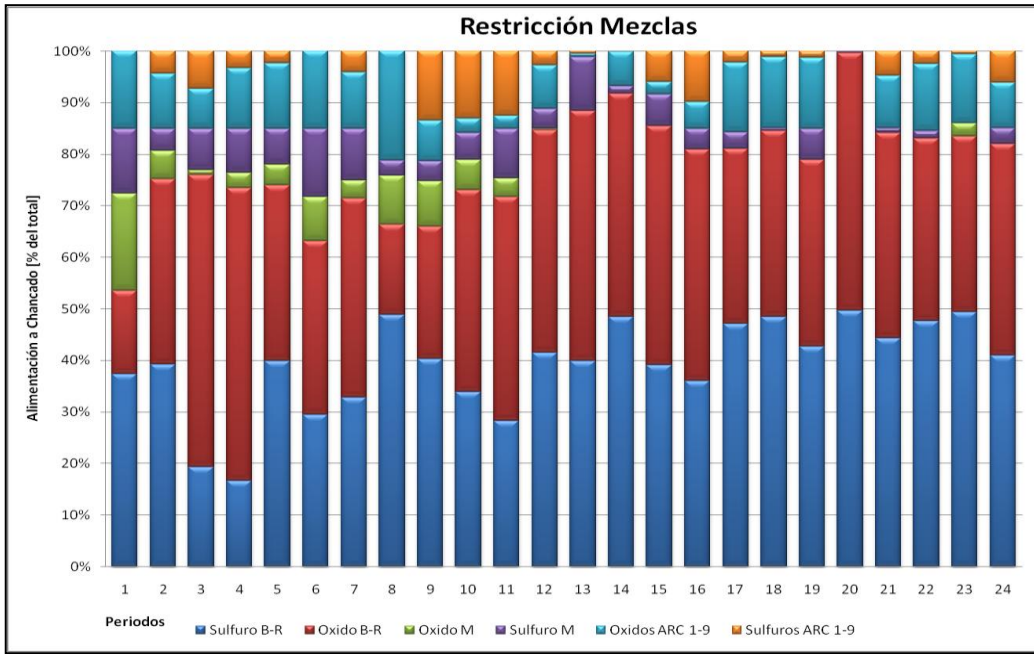


Figura 30. Restricciones de Mezcla, modelo 24 periodos.

Finalmente los resultados geométricos de la secuencia de extracción propuesta por el optimizador para los 24 periodos se visualiza en Vulcan® de la siguiente manera:

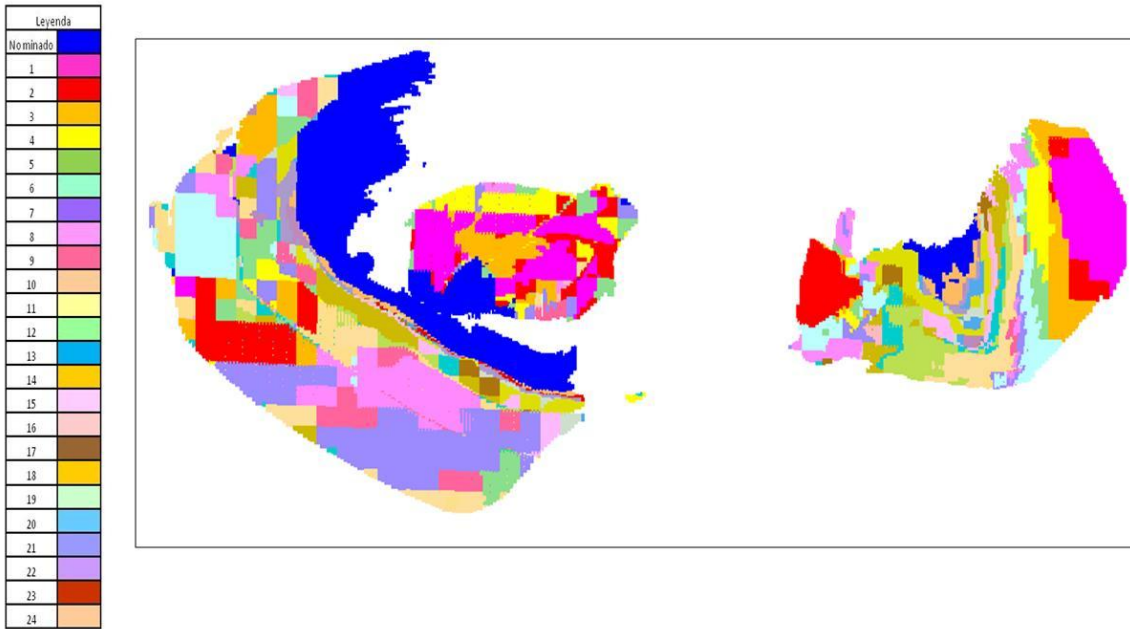


Figura 31. Resultados geométricos, secuencia de extracción 24 periodos.

El aporte de estos resultados radica en la posibilidad de contar con una guía para la construcción de polígonos de extracción, que en este caso de manera gráfica y apuntando directamente a los bloques del modelo, se alinea con las restricciones geometalúrgicas y geométricas del ejercicio de planificación Budget 2013-2014.

5.4. Comparación Plan Budget CMCC

Las estadísticas principales del Plan Budget FY2013-2014 realizado por el área de planificación Mediano Plazo de Compañía Minera Cerro Colorado se expone a continuación:

FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,635	1,665	1,627	1,665	1,547	1,702	1,657	1,502	1,723	1,682	1,739	1,682
CuT [%]	0.73	0.61	0.69	0.70	0.82	0.79	0.82	0.85	0.86	0.81	0.86	0.83
CuT[%]	0.36	0.26	0.32	0.28	0.34	0.38	0.43	0.52	0.34	0.33	0.39	0.33
RS	0.50	0.43	0.46	0.40	0.42	0.48	0.52	0.62	0.40	0.40	0.45	0.40
FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,757	1,718	1,683	1,625	1,688	1,738	1,647	1,506	1,746	1,693	1,721	1,645
CuT [%]	0.86	0.75	0.70	0.74	0.70	0.72	0.67	0.68	0.79	0.76	0.77	0.79
CuT[%]	0.42	0.37	0.35	0.30	0.31	0.31	0.36	0.37	0.45	0.42	0.41	0.41
RS	0.49	0.50	0.50	0.40	0.44	0.43	0.53	0.55	0.57	0.55	0.54	0.52

Tabla 9. Detalle alimentación a chancado en kton y leyes, plan Budget CMCC FY13-14.

Replicando el Plan Budget bi-aunual de Mediano Plazo mediante el optimizador BOS2, bajo las mismas condiciones de la Compañía, no se logra alcanzar los fines en ambos años del plan creado por CMCC. Se observa en la tabla adjunta los tonelajes, leyes y razón de Solubilidad para cada año fiscal del plan CMCC y el plan realizado mediante el optimizador BOS2. En anexos se especifica el tonelaje de finos por periodo.

	Chancado CMCC		Chancado VMM	
	FY13	FY14	FY13	FY14
Toneladas [ton]	19,826,660	20,168,196	17,326,543	18,959,246
CUT [%]	0.78	0.73	0.81	0.68
CUS[%]	0.36	0.37	0.36	0.34
RS	0.46	0.51	0.45	0.5

Tabla 10. Comparación leyes y tonelajes plan CMCC/VMM.

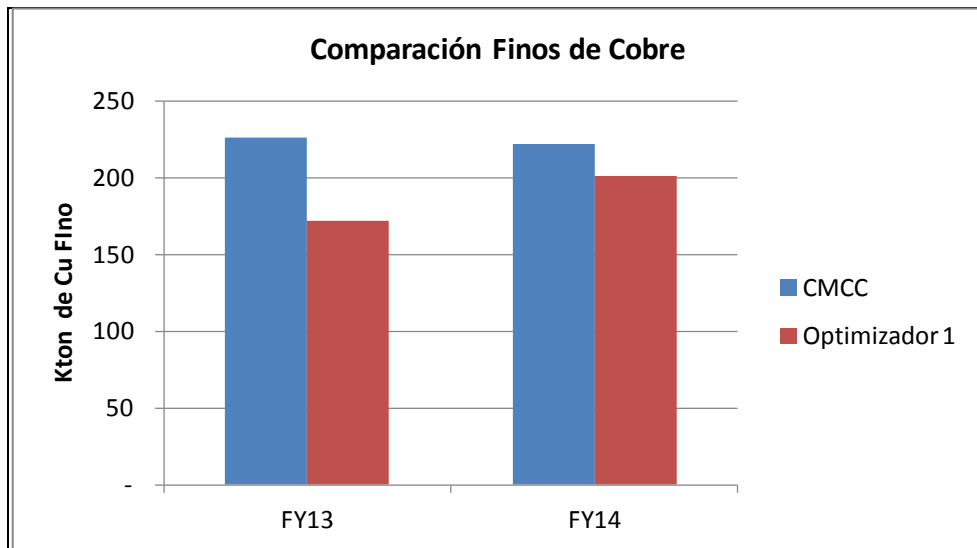


Figura 32. Comparación finos de Cu plan CMCC v/s Primer Modelo Optimización.

El incumplimiento se debe principalmente a la holgura mínima dada en la alimentación a la planta de procesos, si bien al optimizador se debe dar un ancho de banda para encontrar una solución factible, dados los problemas de insuficiencia de mineral existentes actualmente en CMCC, éste tiende a encontrar la solución más rápida y cumplir solamente el mínimo-

Otra razón es el prestripping que el modelo extrae de la fase 14, el optimizador trata de extraer el material de la mina de forma más uniforme posible, dando una diferencia máxima de 30 metros entre fases contiguas, lo que impide exponer el mineral de la fase 13, sin antes remover el estéril de fase 14. Este comportamiento se observa en la tabla a continuación, donde se exponen los bancos considerados en cada plan, el plan del optimizador extrae 5 bancos menos en fase 13 y extrae mayor cantidad de bancos en fase 14.

Fases	Plan CMCC		Plan VMM	
	Banco inicio	Banco final	Banco inicio	Banco final
Fase 10	2330	2270	2330	2290
Fase 11	2360	2290	2330	2290
Fase 12.1	2510	2270	2510	2270
Fase 13	2580	2390	2540	2440
Fase 14	2560	2520	2560	2440

Tabla 11. Fases-Banco consideradas en los planes CMCC/VMM.

En el plan VMM se cumplen en una mayor proporción las restricciones de mezcla de minerales óxidos y sulfuros, a continuación se muestran las gráficas comparativas de ambos planes

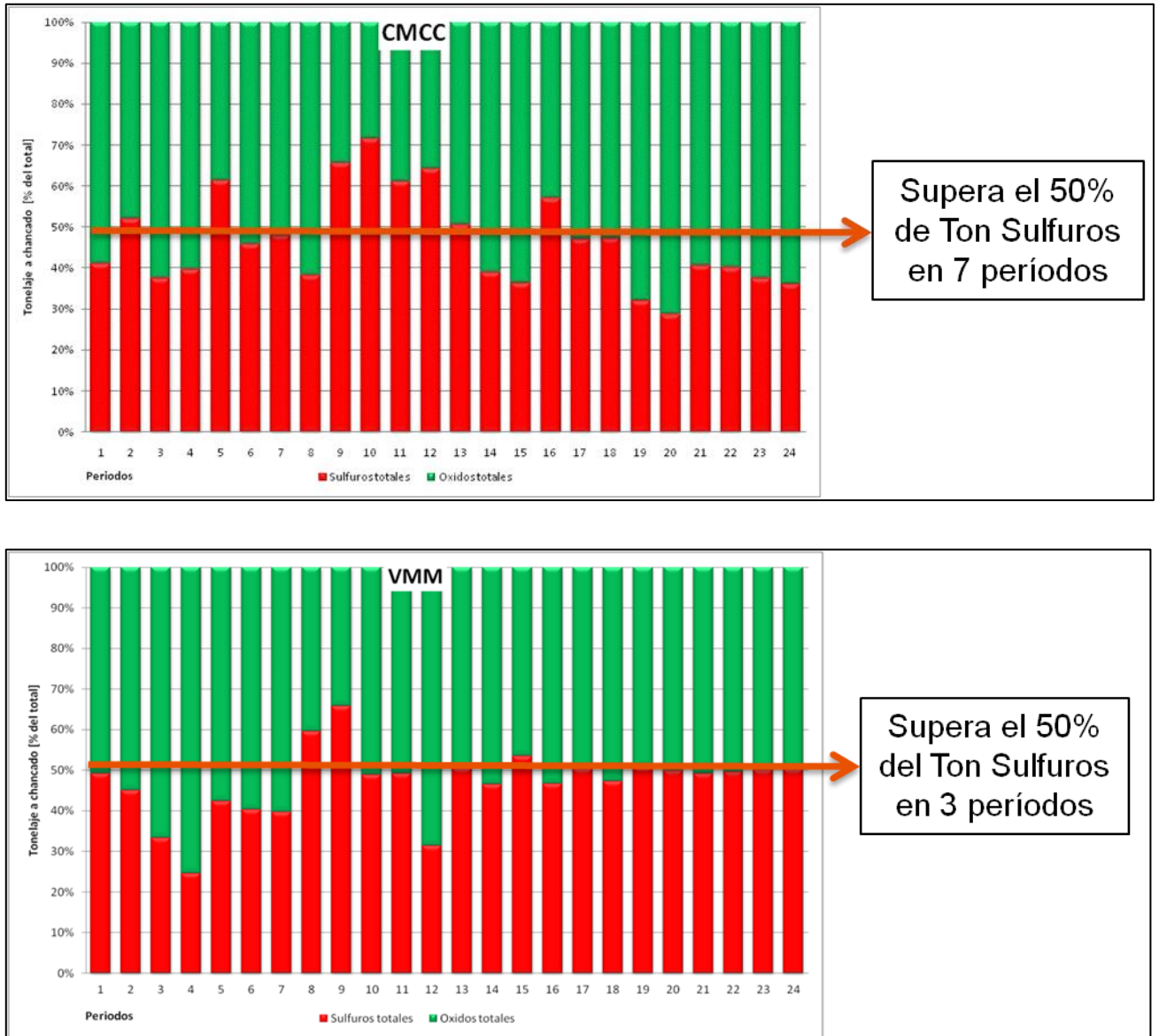


Figura 33. Comparación de Resultados, restricción de óxidos/sulfuros.

Esta condición también incide en los resultados desfavorables por parte de la herramienta, al tener una menor holgura que el plan realizado por CMCC la secuencia de extracción pierde su optimalidad.

En cuanto al remanejo se observa levemente menor movimiento (3%) por parte de los resultados obtenidos en la optimización, como lo indica la figura 35.

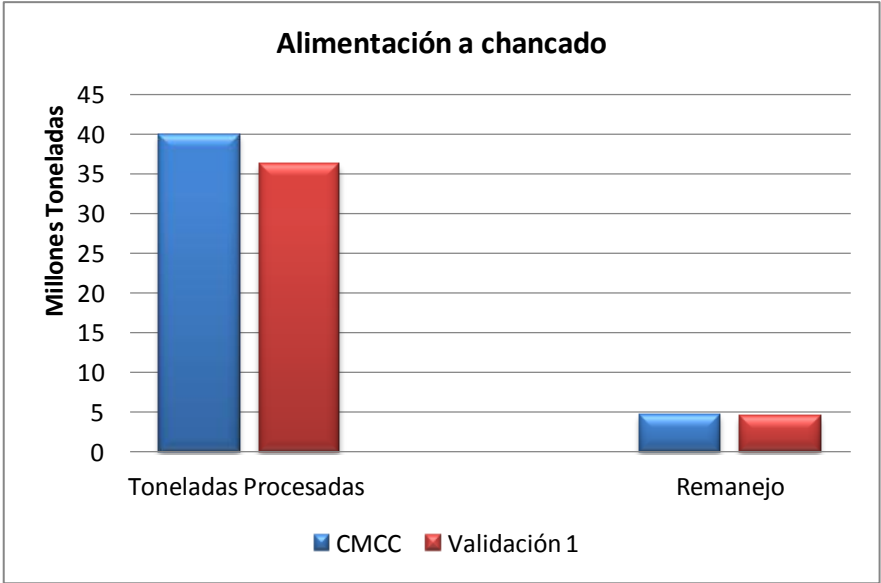


Figura 34. Comparación remanejo plan CMCC v/s Validación 1.

5.5. Análisis de variables, mejoras propuestas al modelo

El primero modelo expuesto en la compañía junto a sus resultados no cumple con las expectativas de superar la alimentación de finos del plan actual, dadas las mismas condiciones. Se analizan los resultados y los motivos de este incumplimiento en el capítulo anterior definiendo las siguientes mejoras:

5.5.1. *Crear accesos estratégicos a cada fase-banco*

Principalmente en la fase 12.1, el objetivo es clavarse en fases inferiores con la finalidad de exponer antes mineral y buscar mejores leyes.

5.5.2. *Aumenta la restricción del mínimo a alimentación a chancado.*

Imponer el mínimo de cumplimiento al chancado como el 90% no es suficiente como se pensó en un principio, no se pudo completar la alimentación faltante con los tonelajes disponibles en stock. La restricción impuesta será cumplir el 95% y un máximo del 105% para dar de todas formas una holgura del 10% al optimizador,

5.5.3. *Libera restricción de diferencia de altura entre fases contiguas.*

Para evitar que el optimizador extraiga gran cantidad de material lastre de Fase 14 y reste recursos para extraer mineral de fase 13 y 12.1, se permite liberar los 30 metros de diferencia altura entre fases contiguas, esto permitirá ir a buscar mineral en Fase 13 y posterga prestripping de Fase 14 para los periodos finales.

5.5.4. *Se acortan los tiempos de resolución considerablemente.*

Durante el proceso de realización de estas pruebas de optimización, los consultores de la empresa REDCO Ingeniería mejoran el algoritmo de resolución, disminuyendo considerablemente los tiempos en la entrega de resultados, lo que da un mayor valor agregado a la herramienta ya que el objetivo principal de la empresa son los escenarios de análisis y rapidez. La solución óptima disminuye de todas formas, pero no de una manera considerable, no resta importancia al factor tiempo que se gana.

Los nuevos mecanismos de resolución no están en los alcances de este estudio.

5.6. Segundos resultados, prueba 24 períodos.

Las estadísticas de los resultados entregados por el optimizador con las mejoras propuestas anteriormente son los siguientes:

Alimentación a Chancado FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,522	1,665	1,627	1,665	1,547	1,702	1,657	1,502	1,723	1,682	1,739	1,682
CUT	1.00	0.79	0.76	0.66	0.68	0.70	0.80	0.86	0.84	0.89	0.87	0.82
CUS	0.42	0.34	0.31	0.27	0.29	0.37	0.40	0.37	0.43	0.36	0.42	0.33
RS	0.42	0.43	0.41	0.41	0.42	0.53	0.50	0.44	0.51	0.41	0.48	0.41
Alimentación a Chancado FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Chancado	1,757	1,718	1,683	1,625	1,687	1,738	1,647	1,506	1,746	1,693	1,721	1,645
CUT	0.78	0.76	0.76	0.71	0.63	0.64	0.54	0.70	0.60	0.63	0.59	0.77
CUS	0.38	0.32	0.33	0.30	0.31	0.28	0.25	0.35	0.28	0.39	0.36	0.48
RS	0.49	0.42	0.44	0.42	0.50	0.44	0.45	0.49	0.46	0.62	0.61	0.62

Tabla 12. Detalle alimentación a Chancado en kton y leyes, segundo plan Budget VMM Fy13-14

Se observa en la siguiente tabla resumen, que en esta prueba los resultados se acercan las restricciones requeridas por la planta de procesos, los tonelajes tienen un 0.57% y un 0.01% de diferencia en cada año, mientras que las leyes superan las del plan CMCC en el primer año, en este caso supera la deficiencia del modelo anterior.

	to Crusher CMCC		to Crusher VMM_V2	
	FY13	FY14	FY13	FY14
Toneladas [ton]	19,826,650	20,168,195	19,714,324	20,167,013
CUT [%]	0.78	0.73	0.81	0.68
CUS[%]	0.36	0.37	0.36	0.34
RS	0.46	0.51	0.45	0.5

Tabla 13. Comparación leyes y tonelajes plan CMCC v/s Optimizador.

Los finos de cobre para cada año fiscal se comparan de la siguiente manera.

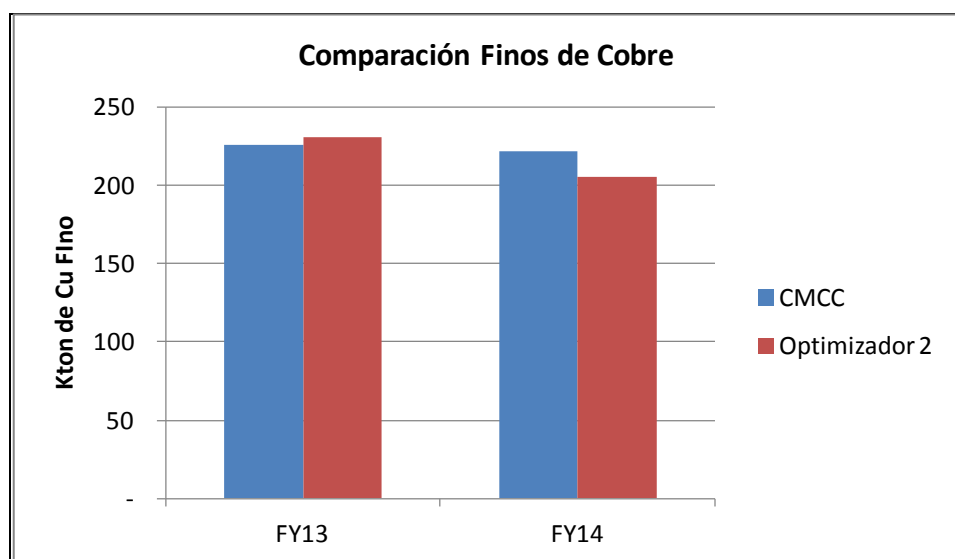


Figura 35. Finos de Cu plan CMCC v/s Segundo Modelo Optimización.

Al aumentar la cantidad de mineral a alimentar con respecto al modelo anterior, son considerados bancos más profundos en el ejercicio de planificación, los nuevos límites en cada fase-banco son:

Fases	CMCC		VMM_2	
	Banco inicio	Banco final	Banco inicio	Banco final
Fase 10	2330	2270	2330	2280
Fase 11	2360	2290	2330	2290
Fase 12.1	2510	2270	2510	2250
Fase 13	2580	2390	2540	2380
Fase 14	2560	2520	2560	2520

Tabla 14. Fases-Banco consideradas en planes CMCC/VMM.

Finalmente Fase 13 profundiza 6 bancos más que el modelo anterior y un banco más que el plan realizado por la compañía, sumando mayor tonelaje en alimentación y menor prestripping en fase 14.

En cuanto al movimiento mina total no hay mayores variaciones, se satura la capacidad de carguío en un 95%, similar al caso anterior, pero con las consideraciones recién nombradas en fase 13 y 14.

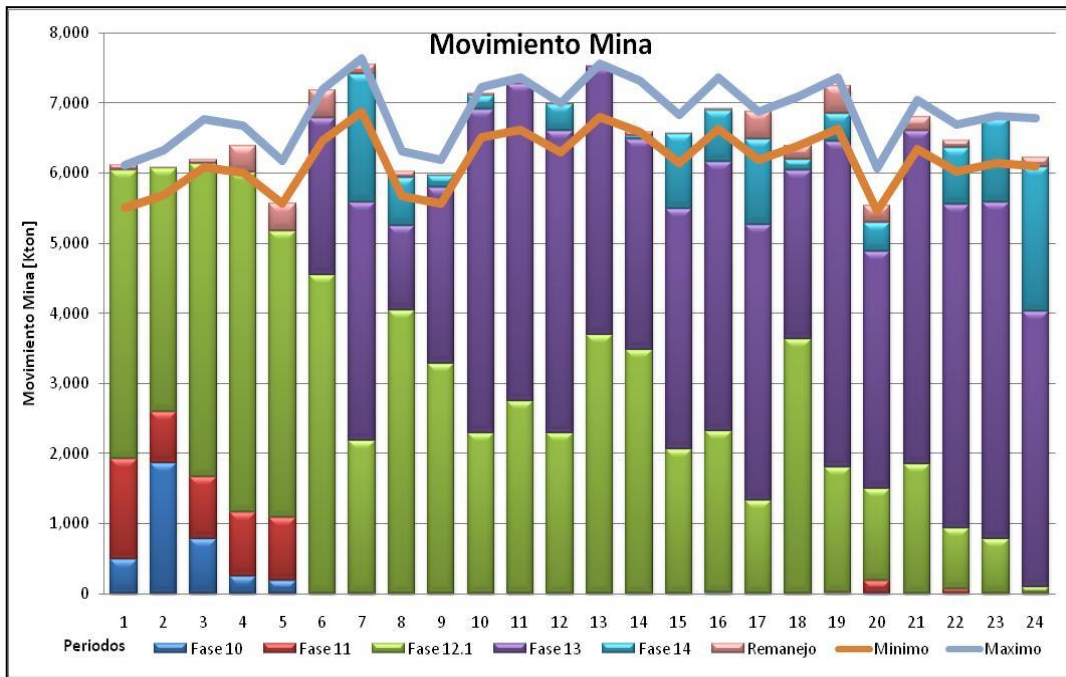


Figura 36. Movimiento Mina Total, segundos resultados 24 periodos.

El cambio se observa en la alimentación a chancado, cumple casi en un 99% las exigencias de la planta de procesos (cumple 100% en todos los períodos, exceptuando el primero). Las leyes de cobre soluble fluctúan entre 0.28 y 0.42, con un promedio de 0.35, las leyes de cobre total fluctúan entre 0.54 y 1, con un promedio de 0.74.

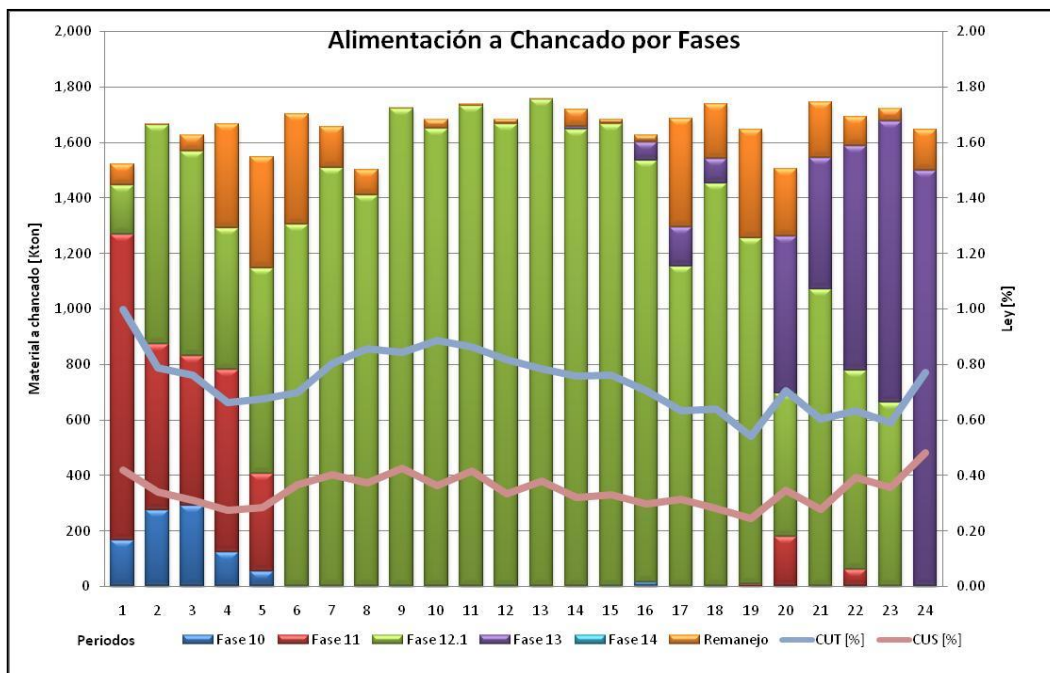


Figura 37. Alimentación a Chancado, segundos resultados 24 periodos.

Los resultados del segundo modelo de optimización, presentan una notable baja en el movimiento de remanejo (27%), lo cual se presenta como gran ventaja.

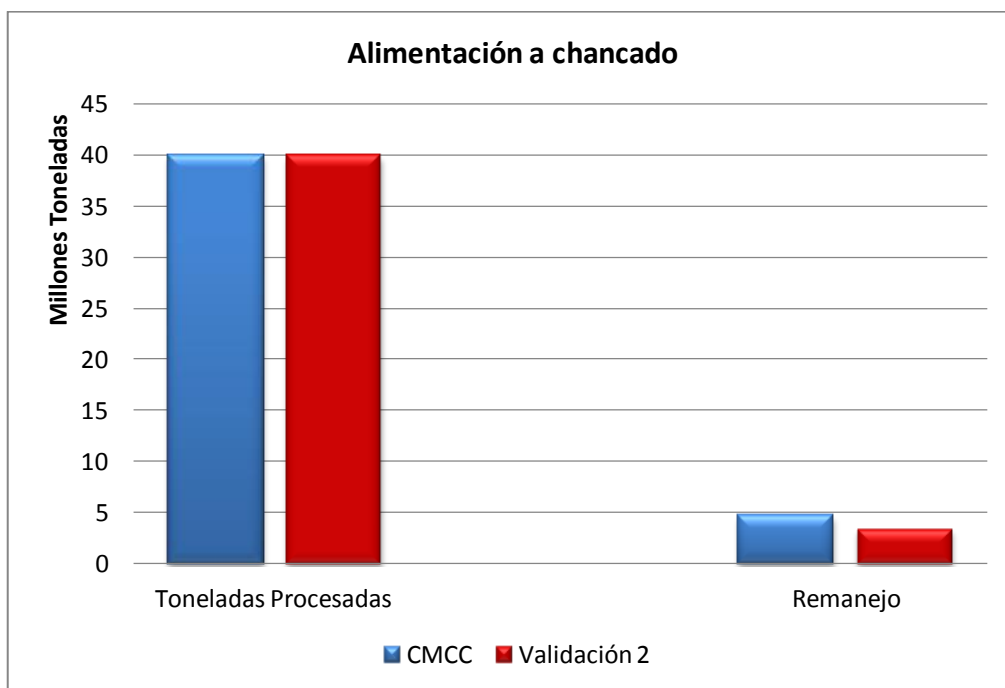


Figura 38. Comparación remanejo plan CMCC v/s Validación 2.

Las restricciones de mezcla de calidades se cumplen de igual manera que el primer plan anterior realizado con el modelo BOS2, mediante la plataforma VMM, la gráfica se encuentra en anexos F.

Los resultados geométricos de la secuencia de extracción cambian, se tienen una nueva guía alineada a las mismas restricciones del modelo anterior, la cual debe ser operativizada para obtener un plan de producción.

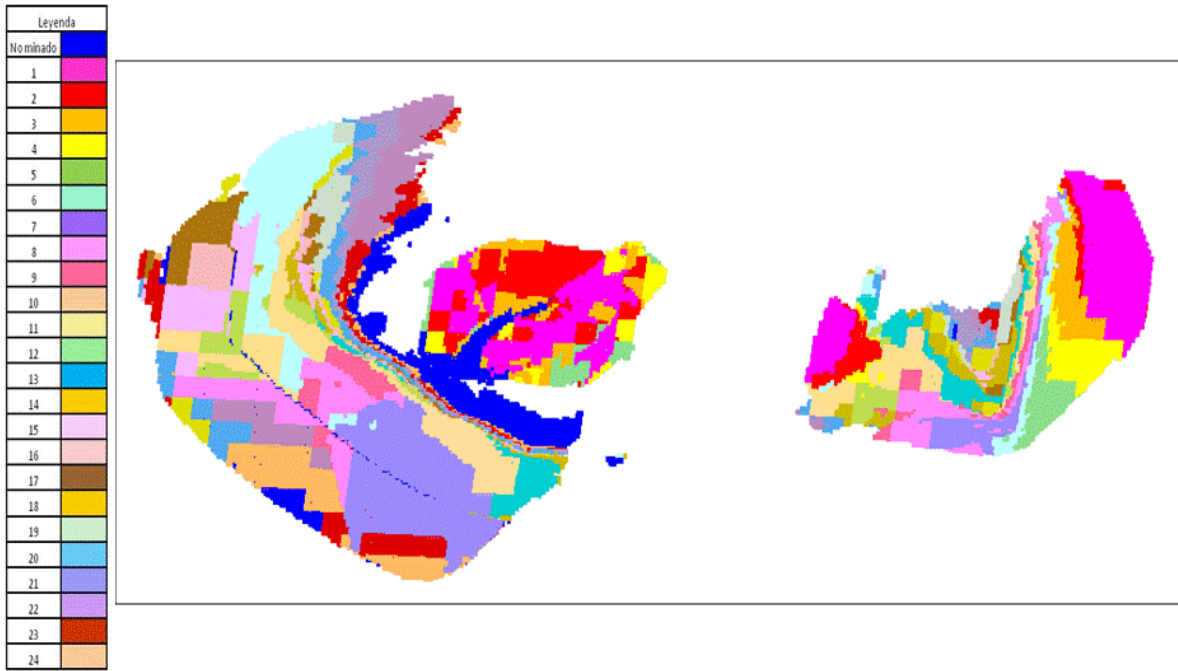


Figura 39. Resultados geométricos, secuencia de extracción 24 periodos.

El tiempo aproximado de resolución del nuevo modelo a 24 periodos mensuales, fue de aproximadamente 3 horas.

6. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Los potenciales de la herramienta de optimización son variados, tanto el modelo BOS2, como la plataforma utilizada VMM son flexibles y su utilización no es compleja. Las siguientes variables se podrían manejar y/o implementar en el modelo, para provocar mejoras y agregar valor al ciclo de planificación, sin embargo éstas necesitan un mayor nivel de desarrollo en la herramienta, lo que implica más tiempo, pruebas, y recursos. Entre ellas se encuentran:

- La posibilidad de asignar valor económico a cada bloque, esto significa que se maximice el beneficio del bloque según el destino o línea de proceso al cual es enviado, obteniendo finalmente una maximización de beneficios del proceso completo. Para ello es necesario contar con los costos detallados de cada proceso relacionado al ciclo de la planificación integrado en la optimización, y por supuesto, un mayor grado de desarrollo de la herramienta en cuanto a la agregación de variables económicas.
- Trabajar las restricciones de mezcla de calidades de manera más detallada, es decir generar las restricciones de porcentajes de mezcla como límites máximos permisibles en pilas de lixiviación, manteniendo la recuperación actual. Esto permitiría relejar las restricciones de mezclas de calidades, ya que el modelo se basaría en el estudio de carga puntual y mineralogía, no en la categorización de calidades existente (ARC 1 al 9).
- Pasar de destinos fijos a destinos variables, hasta el momento el modelo define el destino de cada bloque de material según el atributo “Oretype” especificado en el modelo de bloques (ver anexos A), lo cual es estricto, la oportunidad de mejora está en dar holgura a los distintos tipos de materiales, incorporando leyes de corte variable.

7. CONCLUSIONES

Tras las pruebas realizadas durante estos cuatro meses con el optimizador, se valida su apoyo como herramienta a la Planificación de Mediano Plazo, es capaz de soportar pruebas de optimización con un universo de bloques mayor a los 100.000, entregando los resultados esperados de maximización de finos.

Se debe recalcar que el optimizador no realiza planes de producción por sí solo, sirve como herramienta de análisis al planificador, ya que brinda la posibilidad de posicionarse en varios escenarios de manera simple, al ser la plataforma flexible y fácil de manejar. Sin embargo, modificar el modelo de optimización requiere de una mayor especialización, es decir es necesario contar con el apoyo y soporte por parte de los consultores de REDCO Ingeniería.

En cuanto a los resultados entregados por el nuevo optimizador en la creación del plan bi-anual Budget FY13-14, el primer modelo que incorporaba todas las restricciones acordadas por parte de CMCC y REDCO consultores, no logró el objetivo principal de la herramienta, maximizar los finos de cobre con los mismos recursos incorporados en el plan realizado por los planificadores de CMCC.

Luego de analizar y considerar por ambas partes nuevas variables en el modelo, se realizan nuevas pruebas con los resultados presentados en el capítulo 5, éstos si bien no alcanzan los finos de cobre del plan CMCC en ambos años, son aceptados por el equipo de planificación de CMCC ya que superan con creces los finos del año fiscal 2013, al cual se brinda mayor importancia.

El gran valor de la herramienta es que soporta la planificación del Mediano Plazo agregando variables que no son consideradas normalmente en el ciclo de planificación, entrega una secuencia de extracción geométrica tomando en cuenta restricciones operacionales y de mezcla de minerales.

Sin embargo a estos resultados geométricos es necesario tornarlos operativos, tarea que no es fácil en un horizonte de 24 periodos mensuales, ya que de todas maneras significa invertir bastante tiempo en generar cortes de extracción, además el programa no permite visualizar en detalle las restricciones operacionales, por lo tanto el éxito de la operativización del plan queda sujeto a la experiencia del planificador.

En cuanto a esta operativización, no tiene cabida en los alcances de este estudio, ya que se agrega cierta desviación a los resultados entregados por el optimizador (y depende en gran medida del planificador), el objetivo final de este trabajo de título es conciliar los resultados geométricos con los del plan realizado por CMCC, la idea que el optimizador

supere los finos de cobre de este último es dar cierta holgura al planificador a la hora de la dilución inherente que se tendrá al tornar el plan operativo.

En cuanto a las variables económicas que se puedan agregar a la herramienta para optimizar por beneficio neto, se determina que no presenta mayor ventaja al caso particular de CMCC, al contar con sólo una planta de procesamiento, gran variabilidad mineralógica y poco mineral disponible para exponer, el mejor negocio para la Compañía en estos momentos es optimizar los pocos recursos existentes en términos de leyes y tonelajes (finos). Siguiendo este mismo razonamiento, sería lo mismo evaluar económicamente distintos escenarios de planificación, al evaluar por finos de cobre implícitamente está buscando el mejor negocio.

Finalmente se debe tener presente la incertidumbre a la que se enfrenta todo proceso de planificación, esta herramienta no maneja las diferencias entre el modelo de bloques que se realiza el ejercicio de optimización y la actualización del modelo corto plazo, que integra mayor información (pozos de tronadura), existe un porcentaje de error, especificados en anexos G, tampoco se puede manejar la incertidumbre en la entrega de indicadores por parte de otras áreas, pero sí entrega una ayuda al apoyar al planificador a obtener una secuencia de extracción y por ende un aproximado de las leyes y tonelajes, con mayor rapidez que el método actual.

8. REFERENCIAS

1. Rubio. E, Curso de Planificación Minera, Universidad de Chile, año 2011.
2. Rubio. E, Tópicos avanzados de Planificación Minera, Universidad de Chile. 2007.
3. Manual de Planificación de Largo Plazo Spence, Optimización de Pits 2009.
4. Cacceta. L, Hill. S, “An application of branch and Cut to Open Pit Mine Scheduling”, Journal of Global Optimization, 2003.
5. P L McCarthy. , Pit optimization, AMC reference library- www.ausmin.com.au.
6. Troncoso. F, “Modelo de planificación de corto plazo aplicado a la mina Spence”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, 2009.
7. Lerchs. H, I. F Grossman. “Optimum design of Open-pit Mines”, Transactiones of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
8. Bouzari and Clark, pp.96, 2006.
9. Manual de Operación de Procesos, CMCC 2009.
10. Ávila. J, Días, R. Instructivo Cumplimiento de mezcla y secuencia de descarga en Chancado primario, CMCC 2010.
11. Vargas, M. “Modelo de Planificación Minera de Corto y Mediano Plazo Incorporando Restricciones operacionales y de mezcla” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Tesis para optar a grado de Magister en Minería, Universidad de Chile, 2011.
12. Rubio. E, Vargas. M, Morales. N, “Optimal Open-Pit Short-Term Planning under uncertainty and blending constrains”, Delphos Mine Planning Laboratory, AMTC, University of Chile, 2011.

ANEXO A

Las estadísticas básicas del modelo de bloques Ing_2yp13, recibido por planificación del largo plazo, para realizar el plan Budget de Mediano Plazo, se presentan a continuación.

Tipo de material	N° de bloques	Tonelaje [Mton]	Ley de CuT[%]	Ley de CuS [%]	Mintype	Oretype
Óxido	48.657	117	0,61	0,42	1	11, 12, 13
Sulfuro	27.803	67	0,66	0,11	2	21, 22, 23
Hyp	4.787	11	0,44	0,007	4	40
Msh	8.415	20	0,47	0,05	3	30
Estéril	255.726	578	0,06	0,02	0	0, 50
Total	345.388	793	0,20	0,08	-	-

Tabla 15. Estadísticas y atributos modelo de bloques, Budget FY13-14.

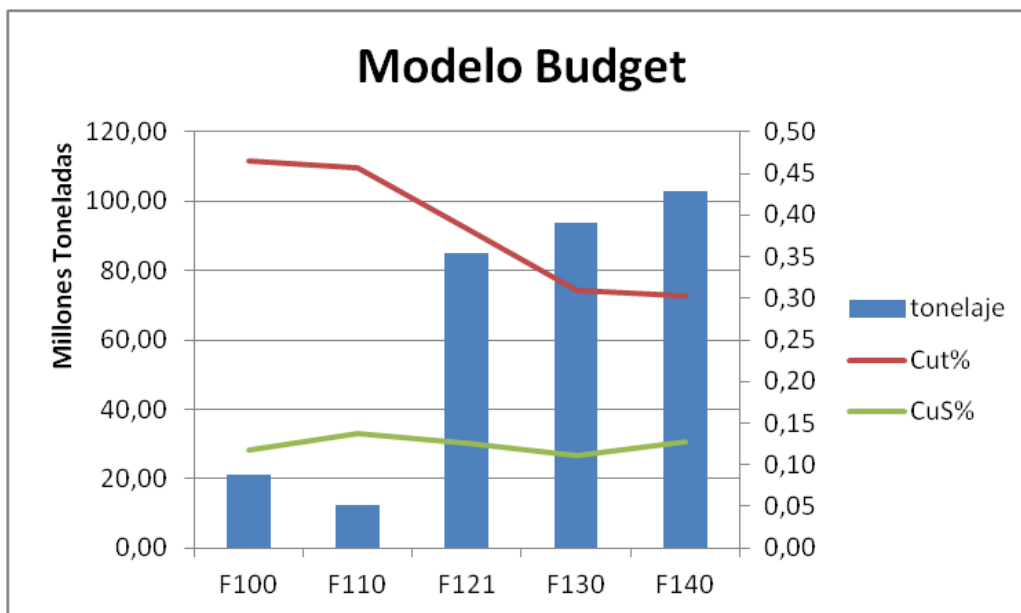


Figura 40. Tonelajes y leyes CuT%, CuS% por fase.

ANEXO B

Estadísticas, resultados primer plan del optimizador.

Alimentación a Chancado FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,101	1,437	1,139	1,332	1,041	1,157	1,126	992	974	1,296	1,562	1,261
Remanejo	259	0	239	65	323	347	411	375	413	217	9	250
Total Chancado	1,360	1,437	1,378	1,397	1,364	1,504	1,537	1,367	1,387	1,513	1,572	1,511
Finos CuT	12.26	11.35	10.08	9.62	8.95	9.80	9.92	7.39	8.96	11.92	12.37	6.74
Finos CuS	4.89	5.20	4.03	4.33	3.75	3.91	3.95	2.95	3.66	6.68	5.76	2.68
RS	0.40	0.46	0.40	0.45	0.42	0.40	0.40	0.40	0.41	0.56	0.47	0.40
Alimentación a Chancado FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,610	1,476	1,558	1,232	1,276	1,366	1,453	1,474	1,472	1,319	1,569	1,496
Remanejo	11	109	101	234	244	241	219	2	149	199	37	114
Chancado	1,620	1,586	1,659	1,467	1,521	1,607	1,671	1,476	1,621	1,517	1,606	1,609
Finos CuT	14.35	13.34	13.11	11.52	10.35	10.89	12.79	10.73	11.32	9.48	10.32	9.37
Finos CuS	7.12	6.23	6.33	5.79	4.30	5.43	5.53	5.30	4.85	4.21	4.44	3.78
RS	0.50	0.47	0.48	0.50	0.42	0.50	0.43	0.49	0.43	0.44	0.43	0.40

Tabla 16. Estadísticas Kton primer plan BOS2.

ANEXO C

Estadísticas, resultados del segundo plan del optimizador, luego de incorporar mejoras.

Alimentación a Chancado FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,444	1,661	1,569	1,290	1,147	1,304	1,509	1,410	1,723	1,650	1,732	1,664
Remanejo	78	4	58	376	400	399	149	92	0	33	8	18
Total Chancado	1,522	1,665	1,627	1,665	1,547	1,702	1,657	1,502	1,723	1,682	1,739	1,682
Finos CuT	15.19	13.15	12.38	11.04	10.47	11.93	13.34	12.88	14.51	14.90	15.05	13.75
Finos CuS	6.36	5.67	5.03	4.55	4.41	6.27	6.68	5.63	7.35	6.09	7.26	5.63
RS	0.42	0.43	0.41	0.41	0.42	0.53	0.50	0.44	0.51	0.41	0.48	0.41
Alimentación a Chancado FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,754	1,655	1,668	1,602	1,295	1,541	1,254	1,262	1,544	1,587	1,676	1,499
Remanejo	3	63	15	24	392	197	393	244	203	106	46	146
Chancado	1,757	1,718	1,683	1,625	1,687	1,738	1,647	1,506	1,746	1,693	1,721	1,645
Finos CuT	13.77	13.02	12.79	11.46	10.70	11.10	8.93	10.60	10.56	10.70	10.17	12.70
Finos CuS	6.69	5.50	5.58	4.84	5.30	4.86	4.05	5.22	4.85	6.64	6.16	7.94
RS	0.49	0.42	0.44	0.42	0.50	0.44	0.45	0.49	0.46	0.62	0.61	0.62

Tabla 17. Estadísticas Kton, segundo plan BOS2.

ANEXO D

Estadísticas Plan CMCC,

Alimentación a Chancado FY13												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,535	1,365	1,407	1,445	1,343	1,612	1,567	1,412	1,633	1,592	1,649	1,592
Remanejo	100	300	220	220	204	90	90	90	90	90	90	90
Total Chancado	1,635	1,665	1,627	1,665	1,547	1,702	1,657	1,502	1,723	1,682	1,739	1,682
Finos CuT	11.86	10.17	11.20	11.67	12.68	13.38	13.59	12.72	14.74	13.71	15.03	13.94
Finos CuS	5.93	4.37	5.15	4.67	5.33	6.40	7.07	7.83	5.89	5.48	6.70	5.58
RS	0.50	0.43	0.46	0.40	0.42	0.48	0.52	0.62	0.40	0.40	0.45	0.40
Alimentación a Chancado FY14												
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lixiviación Expit	1,667	1,520	1,283	1,325	1,388	1,338	1,347	1,206	1,656	1,603	1,537	1,555
Remanejo	90	198	400	300	300	400	300	300	90	90	184	90
Total Chancado	1,757	1,718	1,683	1,625	1,688	1,738	1,647	1,506	1,746	1,693	1,721	1,645
Finos CuT	15.03	12.84	11.73	12.09	11.88	12.53	11.03	10.17	13.85	12.92	13.17	13.01
Finos CuS	7.37	6.42	5.92	4.84	5.23	5.39	5.88	5.61	7.86	7.11	7.11	6.74
RS	0.49	0.50	0.50	0.40	0.44	0.43	0.53	0.55	0.57	0.55	0.54	0.52

Tabla 18. Estadísticas kton, plan CMCC.

ANEXO E

Comparación de finos de cobre, resumen de los tres planes analizados.

	to Crusher CMCC		to Crusher VMM		to Crusher VMM 2	
	FY13	FY14	FY13	FY14	FY13	FY14
Toneladas Finos CuT	154,648	147,228	119,553	138,402	159,686	137,136
Toneladas Finos CuS	71,376	74,622	51,980	62,566	70,972	68,568

Tabla 19. Comparación Finos de cobre de los tres planes.

ANEXO F

Las restricciones de mezcla de calidades segundo plan BOS2

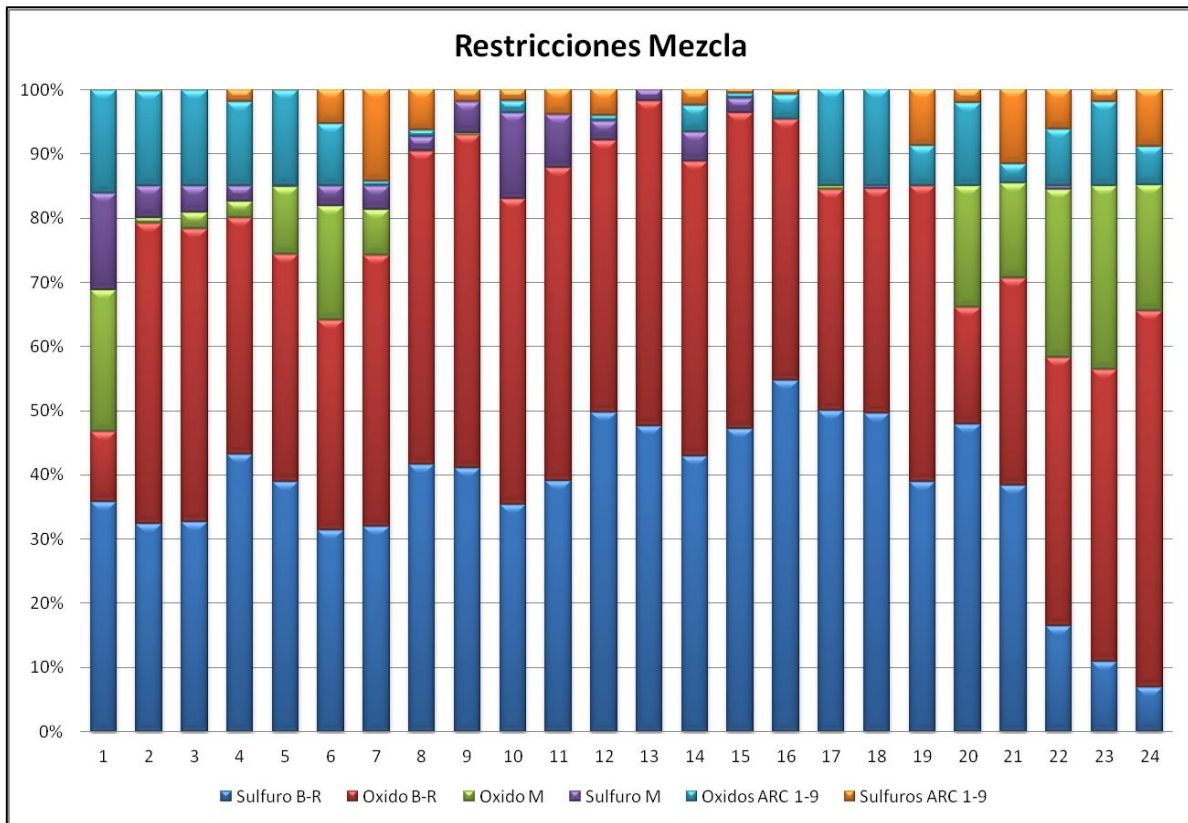


Figura 41. Restricciones de mezcla, segundo plan optimizador.

Restricción de óxidos y sulfuros, segundo plan realizado por el optimizador.

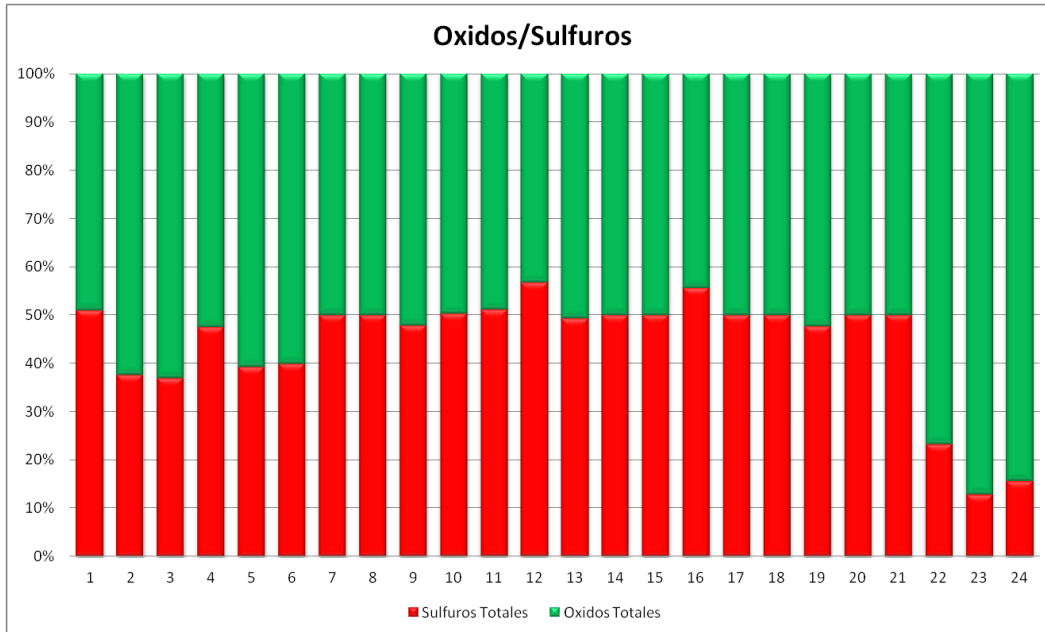


Figura 42. Restricciones de óxidos y sulfuros, segundo plan optimizador.

ANEXO G

Se realiza una comparación entre tres modelos de bloques: el Modelo de Largo Plazo, Mediano Plazo (del plan Budget) y el Modelo de Corto Plazo actualizado con los pozos de tronadura.

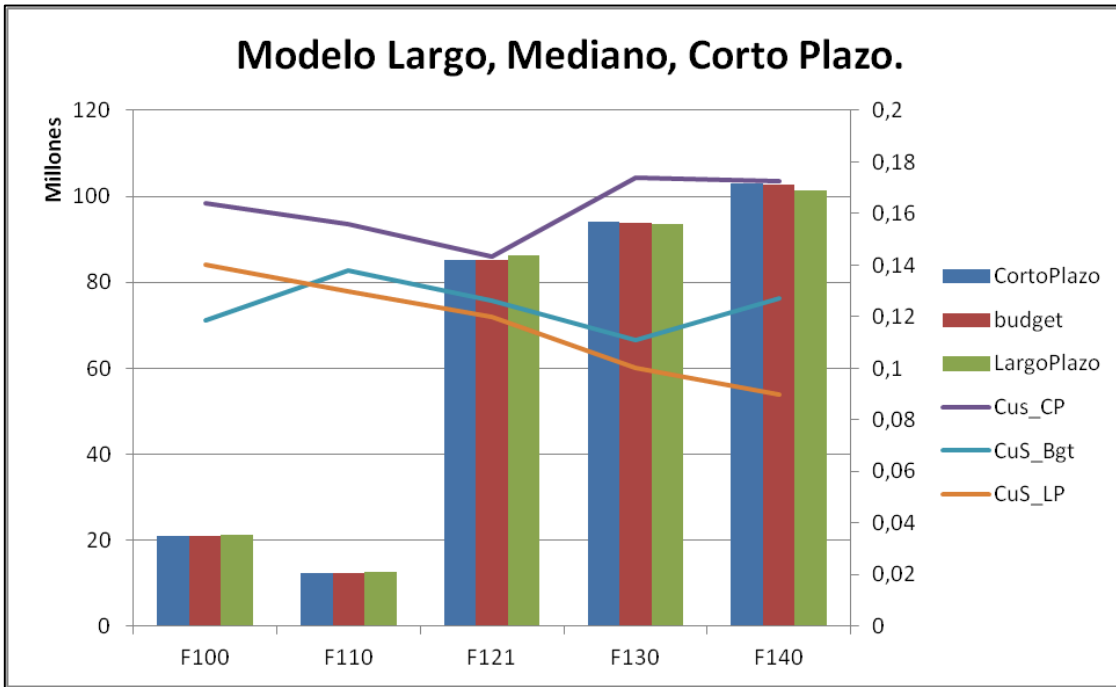


Figura 43. Comparación modelos de Largo, Mediano, Corto Plazo.

Se observan las diferencias entre tonelajes, leyes de cobre soluble.

Se detalla por banco la diferencia entre el Modelo de bloques utilizado en el Plan Budget (Mediano Plazo) actualizado al mes de Febrero y el plan de corto plazo actualizado hasta el mes de Mayo 2012.

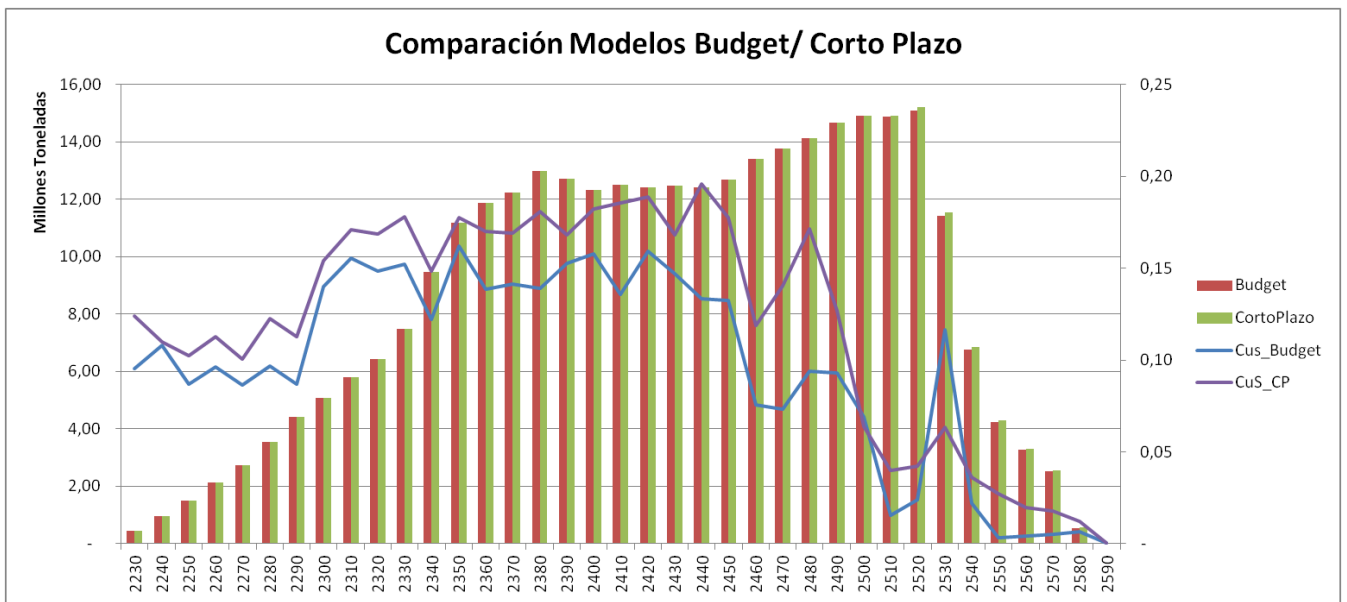


Figura 44. Tonelajes y Cus por banco, modelo Budget y Corto Plazo.

Se cuantifican por fases las diferencias entre tonelaje, cobre total y cobre soluble.

Diferencia Bdg/CP			
Fases	Tonelaje	Cut%	CuS%
F100	0,00	0,17	0,28
F110	0,00	0,07	0,11
F121	0,00	0,01	0,12
F130	0,00	0,25	0,36
F140	0,00	0,18	0,26

Tabla 20. Delta estadística modelo de Mediano/Corto Plazo.