



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

# **METODOLOGÍA DE CONTROL DEL RIESGO EN PLANES DE MINERÍA A CIELO ABIERTO SUJETOS A INCERTIDUMBRE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL DE MINAS  
MACARENA DEL PILAR TAPIA PAREDES**

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARIO SOLARI MARTINI

SEBASTIÁN CARMONA CALDERA

SANTIAGO DE CHILE

2015

## **METODOLOGÍA DE CONTROL DEL RIESGO EN PLANES DE MINERÍA A CIELO ABIERTO SUJETOS A INCERTIDUMBRE**

Convencionalmente, los planes de producción en minería a cielo abierto se basan en una planificación determinística, donde los elementos involucrados se asumen conocidos con certeza. Si bien es una metodología sencilla de implementar, la existencia de incertidumbre en el proceso provoca que la implementación del plan tienda a diferir de lo planificado y conlleva a la ejecución de proyectos que no necesariamente responden a la mejor alternativa del negocio.

El trabajo de memoria se orienta a evaluar el riesgo de cumplimiento del plan debido a 2 tipos de incertidumbre: geológica y de precios. Además, como medida de mitigación y a la vez de mejoramiento de la evaluación económica, se contempla el uso de stocks en la planificación.

En la metodología, se modela el problema de optimización, se construyen escenarios representativos de la incertidumbre presente en la mina, se calibran los ritmos de producción a un intervalo referencial y se define el plan para cada uno. Como resultado, se obtienen múltiples planes de producción. Éstos se evalúan por medio de un criterio y se seleccionan aquellos que sean más atractivos de ejecutar. Finalmente, los planes selectos se presentan para guiar la elección final de un único plan.

A partir de la implementación en un caso de estudio, se juzga positivo el impacto de la incorporación de incertidumbre y del uso de los stocks en la evaluación económica del proyecto, dado un aumento en ordenes entre 4 a 12[%] en promedio, aunque también se tiene en cuenta que el histograma representativo del valor presente neto de los escenarios incorpora mayores variabilidades.

De este modo, de acuerdo con el análisis presentado, la metodología presenta grandes fortalezas: planes acotados a un ritmo de producción referencial, uso de stocks para el control de riesgos, uso de la incertidumbre como una herramienta de mejora del proceso de planificación, entre otros. Sin embargo, también se reconocen oportunidades de mejoramiento, principalmente en términos de hacer práctico el proceder a partir de la incorporación de elementos de diseño.

## **METHODOLOGY OF RISK CONTROL IN OPEN PIT MINING PLANS SUBJECT TO UNCERTAINTY**

Conventionally, production plans in open pit mining are based on a deterministic planning where the involved elements are assumed known with certainty. Even though it is a simple methodology to implement, the existence of uncertainty in the process causes differences between the actual plan and its forecast, and leads to execute projects which are not necessarily matched the best business alternative.

The memory work aims to assess the plan compliance risk due to two types of uncertainty: geological and prices. Furthermore, as a way to mitigate of risk and to improve the economic evaluation, the use of stocks in planning is contemplated.

In the methodology, the optimization problem is modeled, representative scenarios of uncertainty in the mine are built, production rates are calibrated regard to reference interval and the plan for each one is defined. As a result, multiple production plans are obtained. A criterion is used to evaluate and select those which are most attractive to execute. Finally, selected plans are presented to guide the final choice of a single plan.

From implementation in a case study, the impact of incorporating uncertainty and the use of stocks in the economic evaluation of the project are judged positive, since an increase in orders between 4 to 12[%] on average, but also the greater variability of the representative histogram of the net present value of the scenarios is took into account.

Therefore, according to the presented analysis, the methodology has great strengths: Plans limited to a referential production rate, use of stocks for risk control, use of uncertainty as a tool to improve the planning process, among others. However, there are also opportunities for improvement, principally to do practical the proceeding of the incorporation of design elements.

## **Dedicatoria**

*“La única cosa más admirable que la mente y su poder,*

*Es el corazón de una persona*

*Y su capacidad de amar lo que lo rodea”*

*A todos los que amo*

## **Agradecimientos**

Es difícil resumir 25 años de gratitud en una hoja, pero lo intentaré: Primero, agradecerle a Dios, por su amor y por la vida llena de alegrías y bendiciones que me ha dado.

Agradezco a mis papás, Gonzalo y Lorena, quienes no sólo me dieron la vida, también amor, valores y oportunidades para hacer lo que me hiciera feliz. Junto con mis hermanas, Constanza, Paula y Lorena, han formado a la persona que soy ahora. Familia, son lo más preciado que tengo y los amo con mi vida.

En lo propio a este trabajo de título, quiero agradecer a Nelson Morales, por confiarme su ejecución y tener siempre la mejor disposición a escucharme y orientarme, un gran guía. A Mario y Sebastián, por aportar con otras miradas guiándome a hacer un trabajo mejor. A la gente del laboratorio Delphos, por su gran compañerismo y apoyo: En especial, le agradezco a Diego Mancilla, por el tiempo invertido en ayudarme. Por último, a Juanita Vergara y Nicole Cid, quienes me guiaron con los procedimientos administrativos.

En lo referente a prácticas profesionales, agradezco a Julio Neme, Juan Luis Yarmuch, Constanza Paredes y Nelson Morales, por sus gestiones para que pudiera efectuarlas.

A los profesores del colegio Germania y de la Universidad de Chile que marcaron mi paso por ahí y aportaron en mi formación. Quedándome corta con los nombres, destaco: En el colegio, a Carlos Santana, Padres Gregorio y Juventus, Jorge Villarroel y Mario Benítez por sus enseñanzas en las diversas áreas del saber. En la u, a Xavier Emery, por estar siempre que lo necesite, a Gonzalo Montes y Willy Kratch, por darme la oportunidad de ser ayudante y seguir aprendiendo, y a Leandro Voisin, por alentarme a ponerme de pie y nunca rendirme.

No solo quiero agradecer a los profes, también a mis compañeros de clase, incluso a aquellos que estuvieron conmigo sólo un semestre. A todos los que fueron capaces de hacer algún curso más grato de desarrollar. Por sobre todo, agradezco a los que se volvieron más que compañeros, mis amigos. No quiero poner nombres porque de seguro no nombro a alguien importantísimo, pero bueno, nombraré igual: Fran Alvarez, Cata Rochow, Jana Díaz, Andrés Yermany, Pipe Fuenzalida, Gaby Chávez, Juan Neme, Eve Morales, Tito Risetto, Dani Villela, Pelao Arancibia, Magdi Ortiz, Álvaro Gúzman, Dani Adán, Carlitos Navarrete, Rafa Acosta, Seba González, Kathy Salazar, Pato Cabrera, Nini Vergara, Pancho Sepúlveda y tantos otros.

No te olvidé. Lo acordamos y yo no olvido fácilmente: Te dejo este párrafo Carolina Rojas. Ciertamente creo que una de mis mejores decisiones fue algún semestre tomar todos los ramos contigo. Consolidó una gran amistad que sí, catalogo como la mejor que tengo, gracias por eso.

Por último, agradecerte a ti, Guillermo Valenzuela, porque fuiste un pilar fundamental en este trabajo y porque lo eres en mi vida. Con tu forma de ser y con tu amor me haces mejor persona y sacas lo mejor de mí. Te agradezco por eso y por mucho más.

El espacio es limitado, las palabras son pocas, pero la gratitud es enorme. Como dijo Disney, “son muchas las manos y los corazones que contribuyen al éxito de una persona”. Ustedes contribuyeron al mío. Simplemente decir, gracias por estar, también a ti, que estás leyendo esto.

# Tabla de contenido

<b>1</b>	<b><u>CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN</u></b>	<b>1</b>
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVO GENERAL	2
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4	ALCANCES	3
1.5	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	3
<b>2</b>	<b><u>CAPÍTULO: ANTECEDENTES</u></b>	<b>4</b>
2.1	PLANIFICACIÓN MINERA	4
2.2	PLANIFICACIÓN DE LARGO PLAZO DE MINERÍA A CIELO ABIERTO	4
2.3	SECUENCIAMIENTO	5
2.3.1	FUNCIÓN OBJETIVO	5
2.3.2	ACTIVIDADES	6
2.3.3	RESTRICCIONES	8
2.3.4	REPORTES	8
2.4	EVALUACIÓN ECONÓMICA	9
2.4.1	MÉTODOS DE EVALUACIÓN	9
2.4.2	TASA DE DESCUENTO	9
2.5	INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA	10
2.5.1	KRIGING	10
2.5.2	MODELO MULTI-GAUSSIANO	10
2.5.3	SIMULACIÓN SECUENCIAL	11
2.5.4	BANDAS ROTANTES	11
2.6	INCERTIDUMBRE DE PRECIOS	12
2.6.1	MODELOS ESTOCÁSTICOS	12
2.6.2	ÁRBOL BINOMIAL	13
<b>3</b>	<b><u>CAPÍTULO: METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN</u></b>	<b>15</b>
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL	15
3.2	MODELAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3.2.1	ACTIVIDADES	17
3.2.2	RESTRICCIONES	17
3.3	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS	18
3.4	CALIBRACIÓN DEL RITMO DE PRODUCCIÓN REFERENCIAL	18
3.5	CONSTRUCCIÓN DE PLANES	19
3.6	SELECCIÓN DE PLANES	19
3.7	PRESENTACIÓN DE PLANES	20

<b>4</b>	<b>CAPÍTULO: ELEMENTOS DE ENTRADA</b>	<b>21</b>
4.1	CASO DE ESTUDIO	21
4.2	ESTIMACIÓN DE LEYES	21
4.3	ESTIMACIÓN DE PRECIOS	23
4.4	DEFINICIÓN DE TASA DE DESCUENTO	25
4.5	CALIBRACIÓN DEL RITMO DE PRODUCCIÓN	25
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO: RESULTADOS</b>	<b>27</b>
5.1	CONSTRUCCIÓN DE PLANES	27
5.2	SELECCIÓN DE PLANES	28
5.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA	29
5.3.1	PRODUCCIÓN CONSTANTE TRIMESTRAL	29
5.3.2	PRODUCCIÓN CONSTANTE ANUAL	31
5.4	RITMOS DE PRODUCCIÓN	32
5.4.1	PRODUCCIÓN CONSTANTE TRIMESTRAL	33
5.4.2	PRODUCCIÓN CONSTANTE ANUAL	34
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>37</b>
6.1	RESPECTO A LA INCORPORACIÓN DE INCERTIDUMBRE	37
6.2	RESPECTO AL USO DE STOCKS	40
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b>	<b>45</b>
7.1	CONCLUSIONES	45
7.2	TRABAJOS FUTUROS	46
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>47</b>

## Índice de figuras

FIGURA 1: FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LOS PROYECTOS MINEROS	1
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DE SECUENCIAS DE EXTRACCIÓN (IZQ.) WORST CASE (DER.) BEST CASE	5
FIGURA 3: EJEMPLO ILUSTRATIVO DE CARGUÍO Y TRANSPORTE	7
FIGURA 4: DEFINICIÓN DE ACTIVIDADES EN UN PROYECTO	7
FIGURA 5: FORMATO DEL ARCHIVO DE TEXTO A INGRESAR EN UDESS	7
FIGURA 6: LÓGICA DE PRECEDENCIAS USADA EN UDESS	8
FIGURA 7: ÁRBOL DE PRECIO BINOMIAL	13
FIGURA 8: METODOLOGÍA DE TRABAJO	15
FIGURA 9: CRITERIO DE SELECCIÓN DE DESTINO	16
FIGURA 10: FRACCIONES POR DESTINO	17
FIGURA 11: CURVA TONELAJE-LEY DEL CASO DE ESTUDIO	21
FIGURA 12: VARIANZA DEL TONELAJE DE COBRE EN LA REALIZACIÓN DE 500 SIMULACIONES	22
FIGURA 13: VISTA EN PLANTA DE LAS LEYES ESTIMADAS POR KRIGING Y EL PROMEDIO DE LAS SIMULACIONES CONDICIONALES	22
FIGURA 14: (IZQ.) HISTOGRAMA DE LA LEY MEDIA (DER.) FINOS DE COBRE POR ESCENARIO GEOLÓGICO	23
FIGURA 15: VARIANZA DEL VALOR MEDIO DEL PRECIO EN LA REALIZACIÓN DE 500 SIMULACIONES	24
FIGURA 16: REALIZACIONES DE ESCENARIOS DE PRECIOS DEL COBRE	24
FIGURA 17: PRECIOS DE COBRE DEL CASO DE ESTUDIO	25
FIGURA 18: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD SEGÚN CRITERIO I	28
FIGURA 19: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD SEGÚN CRITERIO II	28
FIGURA 20: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 30	29
FIGURA 21: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 8	30
FIGURA 22: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 60	30
FIGURA 23: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 26	31
FIGURA 24: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 8	31
FIGURA 25: HISTOGRAMA DE VPN, SECUENCIA 48	32
FIGURA 26: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 8	33
FIGURA 27: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 30	33
FIGURA 28: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 96	34
FIGURA 29: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 94	35
FIGURA 30: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 98	35
FIGURA 31: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 26	36
FIGURA 32: RITMOS DE PRODUCCIÓN, SECUENCIA 92	36
FIGURA 33: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD DE CASO BASE	37
FIGURA 34: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD DE CASO C <sub>1</sub>	38
FIGURA 35: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD DE CASO C <sub>2</sub>	38
FIGURA 36: HISTOGRAMA DE CASO BASE	39
FIGURA 37: HISTOGRAMA DE CASO C <sub>1</sub>	39
FIGURA 38: HISTOGRAMA DE CASO C <sub>2</sub>	39
FIGURA 39: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD DE CASO CON STOCKS	41
FIGURA 40: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD DE CASO SIN STOCKS	41
FIGURA 41: RITMOS DE PRODUCCIÓN CON STOCK	42
FIGURA 42: RITMOS DE PRODUCCIÓN SIN STOCK	42
FIGURA 43: HISTOGRAMA DE CASO CON STOCKS	43



## Índice de tablas

TABLA 1: ESTADÍSTICA BÁSICA DE LOS SONDAJES DE EXPLORACIÓN	21
TABLA 2: PREDICCIÓN DEL PRECIO DEL COBRE	23
TABLA 3: ELEMENTOS PARA CÁLCULO DE LA TASA DE DESCUENTO	25
TABLA 4: ITERACIONES DEL PRIMER PROTOCOLO	26
TABLA 5: RESUMEN DE RESULTADOS DE LA CONFIGURACIÓN DEL SECUENCIAMIENTO	27
TABLA 6: ESTADÍSTICA BÁSICA DEL VPN DE LOS PLANES SELECTOS POR CRITERIO I	30
TABLA 7: ESTADÍSTICA BÁSICA DEL VPN DE LOS PLANES SELECTOS POR CRITERIO II	32
TABLA 8: ESTADÍSTICA BÁSICA DEL VPN DE LOS PLANES CON DIFERENTES FUENTES DE INCERTIDUMBRE	40
TABLA 9: ESTADÍSTICA BÁSICA DEL VPN DE LOS PLANES CON USO Y DESUSO DE STOCKS	43

## Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1: VALOR PRESENTE NETO	9
ECUACIÓN 2: CRITERIO DE RENTABILIDAD DE PROYECTO EN BASE A TIR	9
ECUACIÓN 3: ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DESCUENTO SEGÚN WACC	9
ECUACIÓN 4: ESTIMACIÓN DEL RETORNO EXIGIDO POR LOS ACCIONISTAS SEGÚN CAPM	10
ECUACIÓN 5: FUNCIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS	11
ECUACIÓN 6: SIMULACIÓN SECUENCIAL	11
ECUACIÓN 7: BANDAS ROTANTES	11
ECUACIÓN 8: MOVIMIENTO GEOMÉTRICO BROWNIANO	12
ECUACIÓN 9: REVERSIÓN A LA MEDIA	12
ECUACIÓN 10: CÁLCULO DE INCREMENTO DEL PROCESO WIENER	13
ECUACIÓN 11: MAGNITUD DEL AUMENTO EN EL VALOR DEL PRECIO	14
ECUACIÓN 12: MAGNITUD DE LA DISMINUCIÓN EN EL VALOR DEL PRECIO	14
ECUACIÓN 13: PROBABILIDAD DE AUMENTO DEL VALOR DEL PRECIO	14
ECUACIÓN 14: BENEFICIO	16
ECUACIÓN 15: ÍNDICE DE FACTIBILIDAD	20

# 1 Capítulo: Introducción

## 1.1 Introducción

La minería consiste en un proceso de extracción de material naturalmente concentrado en la tierra que deriva en un beneficio (Newman, et al., 2010). El proceso consta de 5 etapas: prospección, exploración, desarrollo, explotación y recuperación.

En particular a la etapa de desarrollo, un subproceso que la compone es el llamado planificación, del cual se obtiene como uno de sus productos un plan de producción. El plan de producción representa la estrategia, en términos temporales y cuantitativos, a implementar en una operación minera para alcanzar, entre otras cosas, las metas productivas.

La metodología usual para definir el plan de producción en minería a cielo abierto se basa en una planificación determinística, en la cual se asumen conocidos con certeza el precio, los costos, las leyes y la recuperación minera. Si bien simplifica el proceso, la realidad en la industria minera es mucho más compleja debido a la existencia de incertidumbre en la cuantificación de los parámetros que se emplean.

En efecto, existe incertidumbre en los proyectos mineros. La Figura 1 presenta algunas de las fuentes que la originan, tanto de carácter externo (asociados a la industria) como interno (asociados al proyecto en cuestión).



Figura 1: Fuentes de incertidumbre en los proyectos mineros

Fuente: (Mayer & Kazakidis, 2007)

En particular a los alcances de este documento, las fuentes de incertidumbre que se reconocen de mayor interés a analizar son: geológica y de precios.

La incertidumbre geológica se refiere a la incerteza en la cuantificación de las propiedades geológicas características del(los) metal(es) de interés presente(s) en un yacimiento. Se debe a los altos costos asociados a las campañas de sondajes (Tulcaza, 1999): El costo en que se incurre al rescatar muestras de un terreno se compensa limitando la cantidad de muestras y la información disponible. La ausencia y la necesidad de información referente a todo el yacimiento obligan al uso de métodos estadísticos para estimar dichas propiedades.

Respecto a la incertidumbre en el precio, ésta se define como la oportunidad o especulación de que el precio de un activo cambie en el futuro (Farlex Financiamiento, 2012). En específico al caso minero, según Abdel Sabour y Dimitrakopoulos (Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011) una de las mayores fuentes de incertidumbre en el negocio minero corresponde al precio de los metales. Su alta volatilidad no permite que mantenga una tendencia constante, lo que provoca que las predicciones de su comportamiento sean meramente especulativas.

Ignorar la incertidumbre puede resultar en un plan cuya evaluación posee riesgos subestimados, hecho que en términos monetarios puede incurrir en millonarias pérdidas, especialmente si se considera el capital intensivo asociado a la inversión minera. De este modo, su consideración en la planificación, más que un problema, se entiende como una oportunidad que contribuye significativamente a la correcta determinación del plan.

Así, dentro del proceso se incluye el concepto de análisis de riesgo, cuyo principal objetivo en la planificación minera se refiere a detectar las incertidumbres que mayor impacto tienen en los resultados de la mina, para luego medir su variabilidad y, finalmente, evaluar sus efectos en el plan minero (Lay, 2012). Normalmente, el proceso inicia con la asignación de indicadores de frecuencia y magnitud a un listado de indicadores, de manera que se tenga evidencia que justifique el análisis de determinados factores inciertos. Luego, a partir de la búsqueda de datos y el uso de herramientas estadísticas, se ajustan curvas de distribución representativas de la variabilidad de los factores en el tiempo. Una vez conocidas las curvas de distribución, se efectúan simulaciones de las incertidumbres y se evalúa el riesgo en el comportamiento del plan. El indicador que comúnmente se recomienda medir para dichos efectos es la producción y en caso de incorporar variaciones en el precio del metal e insumos, también es posible medir el VAN de un plan (Lay, 2012).

Además, se contempla el empleo de stocks, ya que es un hecho bien establecido que su uso proporciona una flexibilidad adicional en la toma de decisiones respecto al procesamiento de mineral en la planta (Asad, 2005). Dentro de sus principales flexibilidades se destaca la opción de alimentar con mineral a la planta en caso que se obtenga poco mineral de la mina en un período, en favor de la mitigación de riesgos en el alcance de la capacidad óptima de procesamiento.

## **1.2 Objetivo General**

Desarrollar una metodología de planificación a largo plazo que permita analizar y reducir el riesgo en la producción minera debido a la incertidumbre geológica y de precios mediante la gestión optimizada de stocks.

### 1.3 Objetivos Específicos

- Implementar estrategias de simulación de leyes y precios.
- Evaluar el impacto que tiene el uso de stocks sobre el riesgo y la variabilidad de los planes.
- Evaluar la variabilidad que se produce en los planes al incorporar incertidumbre.
- Definir criterios de selección de planes.
- Presentar alternativas de producción de manera consecuente, con entendimiento de los riesgos asociados a su elección.

### 1.4 Alcances

- **Horizonte de planificación a largo plazo orientado a minería a cielo abierto:** Se analizan antecedentes e implementan metodologías ligadas a este horizonte y método de explotación. No necesariamente responden a los requerimientos a considerar en otras condiciones.
- **No se contempla el diseño de la mina:** Se considera la extracción de los bloques definidos por el pit final. No se cuestiona la factibilidad de su extracción ni la subestimación de la cantidad debido a condiciones de diseño.
- **Costos y recuperación minera constantes:** Se mantiene el enfoque convencional de planificación en materias de costos y recuperación. Se pretende evaluar únicamente el efecto en los planes de la incertidumbre en las leyes y en el precio.
- **Uso de herramienta de secuenciamiento a nivel de banco:** Se busca reducir la cantidad de elementos para efectos prácticos de modelamiento.
- **Estudio de caso para un yacimiento de cobre:** La metodología se evalúa a partir de un caso de estudio. Se emplean para las estimaciones información de entrada concordante con dicho caso.

### 1.5 Estructura de la memoria

El Capítulo 2 presenta antecedentes respecto a la planificación minera a cielo abierto y las metodologías a disposición para simular la incertidumbre.

El Capítulo 3 describe la metodología de resolución de la problemática.

El Capítulo 4 presenta una descripción general del caso de estudio y la definición de los elementos de entrada al problema de optimización.

Los Capítulos 5 y 6 muestran los resultados y sus análisis, respectivamente.

Finalmente, el Capítulo 7 expone las conclusiones y sugerencias de trabajos futuros que se desprenden del trabajo en cuestión.

## 2 Capítulo: Antecedentes

### 2.1 Planificación minera

La planificación minera se define como el proceso de ingeniería de minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo (Rubio, 2006), entendiendo como mejor negocio a aquel que se alinea mejor a los objetivos estratégicos de la organización que la implementa.

Según Rubio (Rubio, 2007), en función del nivel de precisión de los datos y de la escala espacial de los períodos de duración del plan minero la planificación se divide en los siguientes horizontes:

- **Planificación de largo plazo:** Define una envolvente económica en función de las reservas mineras disponibles, sobre la cual se trabaja para construir un plan minero anual, estableciendo el tamaño de la mina, el método, ritmo, secuencia de explotación y el perfil de leyes de corte. Se incorporan variables más bien promedio y generales, debido a que el tamaño del problema no permite un mayor nivel de detalle.
- **Planificación de mediano plazo:** Por lo general abarca un horizonte de tiempo trianual y anual. Construye planes de producción orientados a obtener las metas productivas en el corto plazo definidas en el largo plazo. Permite asegurar el presupuesto de operaciones y retroalimentar la planificación de largo plazo.
- **Planificación de corto plazo:** El horizonte de tiempo de esta planificación es diario, semanal, mensual y trimestral. Es en esta instancia de planificación donde se deben analizar los recursos utilizados en la operación de la mina. Debe recopilar la información operacional de modo que permita retroalimentar la planificación de mediano y largo plazo.

### 2.2 Planificación de largo plazo de minería a cielo abierto

La planificación a largo plazo recibe como información de entrada la anomalía geológica de interés representada por bloques. Sobre cada bloque se manejan datos referentes a su ubicación geográfica, volumen, ley de elementos con valor económico, geología, metalurgia, entre otros.

La metodología que actualmente se implementa en gran parte de la industria es la propuesta por Whittle (Whittle, 1998), basada en la valorización de pits anidados. Éstos corresponden a aquellos que se generan por la ejecución del algoritmo de Lerch y Grossmann (Lerch & Grossmann, 1965) y el empleo de un factor multiplicador del beneficio, asociado a la extracción de los bloques.

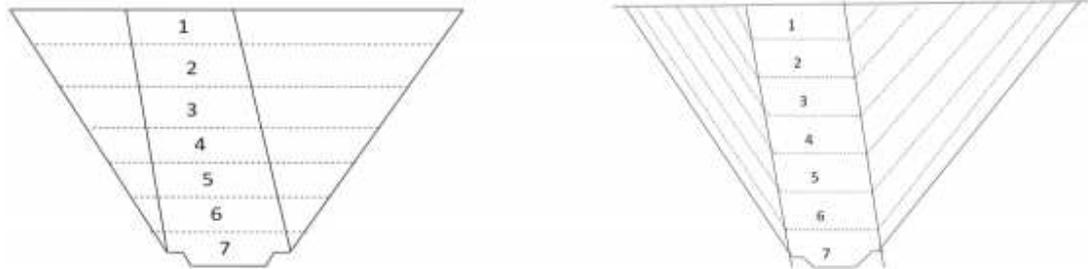
Una vez que se obtienen los pits anidados, cada uno se evalúa económicamente dadas 2 secuencias de extracción: *Worst Case*<sup>1</sup> (ver Figura 2, Izq.) y *Best Case*<sup>2</sup> (ver Figura 2, Der.). Como sus nombres indican, corresponden a los casos límites de valorización. Es natural pensar en la selección de la mejor estrategia, *Best Case*, sin embargo operacionalmente es prácticamente

---

<sup>1</sup> Corresponde a la secuencia de extracción banco por banco.

<sup>2</sup> Corresponde a la secuencia de extracción pit por pit

imposible de implementar debido a la generación de pits que no cumplen el ancho mínimo requerido para la operación de equipos. Por dicho motivo, en base a los casos límites se busca un caso intermedio que define el pit final. Generalmente, este último refleja la mejor valorización económica capaz de garantizar adecuadas condiciones para la operación de equipos.



**Figura 2: Representación de secuencias de extracción (Izq.) Worst case (Der.) Best Case**

Las figuras hacen alusión a la extracción de un cuerpo mineralizado tabular, en una secuencia orientada de arriba hacia abajo. Las líneas punteadas representan la cantidad de material removido en alguno de los 7 períodos de extracción.

Fuente: (Vargas, 2011)

Luego, se define la secuencia de extracción de los bloques con su respectiva evaluación económica, para finalmente calcular el valor del proyecto.

## 2.3 Secuenciamiento

El problema de secuenciamiento de bloques no solo considera cuales bloques remover, también cuando extraer esos bloques (Newman, et al., 2010). La introducción del factor tiempo permite entre otras cosas reflejar de manera más precisa el valor de un bloque, pero también involucra la consideración de una mayor cantidad de elementos en la resolución del problema.

La herramienta de secuenciamiento a utilizar en este trabajo de título es el llamado UDESS (*Underground Development Sequencer and Scheduler*). Fue desarrollada en el laboratorio de planificación minera Delphos originalmente con el propósito de ser utilizada en minería subterránea. Sin embargo, su lógica de funcionamiento ha permitido la extensión de su empleabilidad al campo de la minería a cielo abierto.

UDESS, como herramienta de optimización, construye y resuelve un modelo de programación lineal en base a un archivo de texto, en el cual se especifican actividades (entidades a secuenciar y agendar) y sus atributos.

### 2.3.1 Función objetivo

Bajo el concepto de que la minería corresponde a un negocio en que toda actividad debe ser justificada para producir el mejor retorno económico, UDESS define como función objetivo la maximización del valor presente neto (Rocher, 2012).

### 2.3.2 Actividades

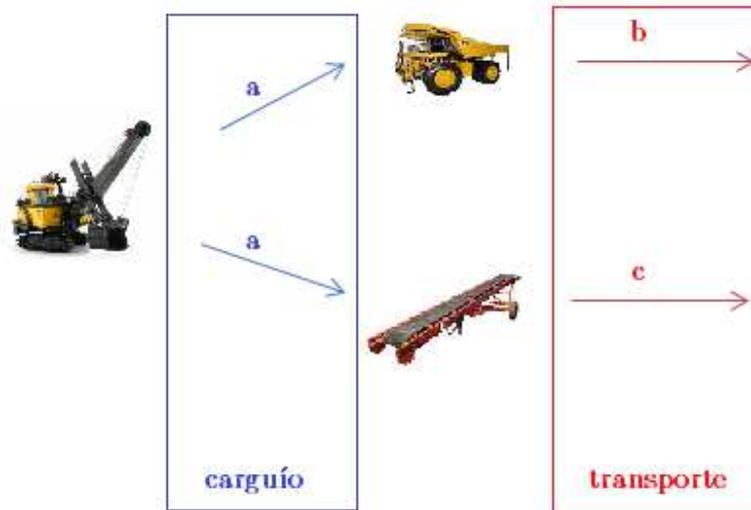
Para plantear el problema de optimización, se define un conjunto de actividades  $A$ , a secuenciar dentro de un set de períodos  $t=1, 2, \dots, T$ . Cada actividad  $i \in A$  posee los siguientes atributos como mínimo:

- *Máxima tasa de avance*: Proporción máxima de actividad que se puede ejecutar en un período. Busca reflejar las limitaciones de avance en las actividades, producto de la tecnología utilizada, el rendimiento de los equipos, entre otros.
- *Mínima tasa de avance*: Proporción mínima de actividad que se requiere efectuar en un período en caso de que ésta se inicie. Tiene por objeto obligar a las actividades a desarrollarse sin detenciones.
- *Costo y/o Ingreso*: Aquel asociado al desarrollo de la actividad en el período  $t$ . Adicionalmente, se pueden definir costos o ingresos referentes al inicio y/o cese de la actividad, en virtud de incorporar elementos económicos fijos, a considerar para la selección del plan que genere el mejor negocio.

Las actividades se clasifican en dos tipos:

- **Convencional**: Se define por sí misma, con una única actividad que se puede ejecutar.
- **Dummy**: Corresponde a un conjunto de actividades, llamadas composicionales. Su desarrollo se define por la suma de las fracciones de desarrollo de cada actividad composicional  $a_i$  perteneciente a ella. Así, no es necesario ejecutar ni completar todas las actividades que la componen.

A modo de aclaración, se presenta el ejemplo de la Figura 3, en la cual se tienen dos actividades: carguío y transporte. Se tiene un único camino para completar la acción de carguío, ya que la pala no percibe diferencia entre cargar al camión o a la correa transportadora. Luego, la acción de completar el carguío de material corresponde a una actividad de tipo convencional. En tanto, se tienen dos alternativas de transporte: La actividad *dummy* correspondiente a transportar se puede completar mediante la acción de un camión (Actividad composicional 1) o de una correa transportadora (Actividad composicional 2), en las proporciones de uso de los transportes que se estimen convenientes a partir de la optimización del problema.



**Figura 3: Ejemplo ilustrativo de carguío y transporte**

El carguío se efectúa con palas y posee un beneficio a, ya sea si se carga un camión o una correa. El transporte se desarrolla con camiones o correas y su ejecución tiene un beneficio b o c dependiendo del equipo empleado.

El empleo de actividades *dummy* es opcional. Lo relevante es especificar su uso o desuso al incorporar actividades en un proyecto P a optimizar. Para hacer efectivas dichas acciones se debe desarrollar un código de lectura de un archivo de texto, como el expuesto en la Figura 4. El archivo de texto deber ser delimitado por tabulaciones y poseer un formato como el mostrado en la Figura 5.

```
#Proyecto P de n periodos trimestrales
P= ConstructionProject([3 for i in xrange(n)])
P.MaxRateAttr = "VMax"
P.MinRateAttr = "VMin"
P.CostAttr = "Cost"
P.PreCostAttr = "PreCost"
P.PostCostAttr = "PostCost"
P.ProfitAttr = "Value"

#lectura de archivo.txt
R=SimpleActivityReader(P, "Archivo.txt")
#parcelacion de archivo especificando uso de actividades dummy
R.ParseFile(subactivities = True) #en caso de no usar, escribir False
```

**Figura 4: Definición de actividades en un proyecto**

Actividades	Subactividades	VMax	VMin	Cost	PreCost	PostCost	Value
ID.Act_Normal	-						
ID.Act_Dummy	-						
ID.Act_Composicional	ID.Act_Dummy						

**Figura 5: Formato del archivo de texto a ingresar en UDESS**

Cabe destacar que la segunda columna, referente a las Subactividades, no se incluye en caso de poseer sólo actividades de tipo convencional.

### 2.3.3 Restricciones

En primer lugar se tiene las restricciones dadas por los límites establecidos por las tasas de avance. UDESS crea automáticamente dichas restricciones.

Como segundo elemento se tienen las restricciones de precedencias. Para cada actividad es posible definir múltiples grupos de precedencias y cada grupo consiste en un conjunto de actividades. UDESS asume que la actividad se puede realizar una vez que se completan todas las actividades de al menos uno de los grupos de precedencias.

A modo de ejemplo, se presenta la Figura 6, dónde se tiene una actividad que posee 2 grupos de precedencias. La actividad 4 puede iniciar su actividad si se completan las actividades 1 y 2 o bien si se concluye la actividad 3.



**Figura 6: Lógica de precedencias usada en UDESS**  
Esquematización de las actividades y grupos de precedencias definidos por el código

### 2.3.4 Reportes

Tras la ejecución de UDESS, el programa permite la generación de archivos de texto con información referente a (Rocher, 2012):

- Plan de progreso: Lista con todas las actividades y el porcentaje de avance de éstas por período.
- Estado del plan: Estado de las actividades por período, a través de una variable que adquiere el valor '0' si la actividad aún no ha iniciado, '1' si está en desarrollo y '2' si ha concluido.
- Plan económico: Resumen por período del estado monetario, el consumo de recursos u otro parámetro que se desee controlar.
- Datos: Lista de actividades del modelo, con su fecha de inicio y término. La fecha desde la cual se da inicio al proyecto corresponde a la fecha actual de ejecución de la optimización.
- VPN: Valor presente neto asociado al proyecto optimizado.
- Tiempo transcurrido: Cantidad de segundos que se demora la ejecución del proceso, desde que se inicia la lectura de los archivos hasta la escritura de los archivos de salida.

## 2.4 Evaluación económica

### 2.4.1 Métodos de evaluación

La medida del valor económico de un proyecto que se utiliza con mayor frecuencia es el valor presente neto (VPN), el cual representa los excedentes que se obtienen de un proyecto tras el pago de las inversiones y costos asociados a su ejecución. De esta manera, un proyecto será rentable si el valor presente neto es positivo (Contreras, 2011).

El procedimiento más habitual para su estimación se efectúa con el cálculo de los flujos de caja descontados (FCD), según la expresión indicada a continuación.

$$VPN = F_0 + \sum_{t=1}^T \frac{F_t}{(1+r)^t}$$

Ecuación 1: Valor presente neto

Fuente: (Contreras, 2011)

Dónde  $F_t$  representa al beneficio obtenido en el período  $t$ ,  $F_0$  a la inversión y  $r$  a la tasa de descuento.

Como indicador asociado al valor presente neto se tiene la tasa interna de retorno (TIR), siendo ésta aquella a la cual el valor presente neto del proyecto es nulo. La TIR representa la rentabilidad del proyecto, mientras que la tasa de descuento se relaciona a la rentabilidad mínima esperada del capital, de modo que se debe cumplir la siguiente desigualdad para que el proyecto sea rentable:

$$TIR > r$$

Ecuación 2: Criterio de rentabilidad de proyecto en base a TIR

Fuente: (Contreras, 2011)

### 2.4.2 Tasa de descuento

Para obtener una tasa de descuento consecuente con el nivel de riesgo del proyecto, una metodología de cálculo corresponde a WACC (*Weighted Average Cost of Capital*), el cual se determina en base a la Ecuación 4.

$$WACC = K_e * \frac{CAA}{CAA + D} + K_d * (1 - T) * \frac{D}{CAA + D}$$

Ecuación 3: Estimación de la tasa de descuento según WACC

Fuente: (Enciclopedia Financiera, s.f.)

Dónde  $K_e$  y  $K_d$  son las tasas de descuento de los accionistas y de la deuda financiera, respectivamente, CAA es el capital aportado por los accionistas, D es la deuda financiera y T es la tasa de impuesto a las ganancias.

El retorno exigido por los accionistas,  $k_e$ , se calcula con la metodología CAPM (*Capital Assets Pricing Model*), expuesta en la Ecuación 4.

$$k_e = R_f + \beta * [R_m - R_f]$$

**Ecuación 4: Estimación del retorno exigido por los accionistas según CAPM**

Fuente: (Black, et al., 1972)

Dónde  $R_f$  es la tasa libre de riesgo,  $[R_m - R_f]$  es la prima por riesgo y  $\beta$  es el riesgo sistemático.

## **2.5 Incertidumbre geológica**

### **2.5.1 Kriging**

El kriging es un método de interpolación espacial que permite la estimación de una o más variables regionalizadas a partir de un conjunto de datos de dicha variable. El estimador minimiza la varianza del error a partir de una expresión donde se combinan linealmente los datos al mínimo error posible.

Se obtiene una estimación precisa cuyo error tiene una esperanza nula. Sin embargo, la dispersión de los valores estimados es menor que la dispersión de los valores verdaderos. Esta propiedad tiene varias consecuencias (Emery, 2011):

- El variograma de los valores estimados no tiene efecto pepita, aunque no sea el caso con los valores reales, y su meseta es menor que el variograma de los datos.
- La variabilidad de los valores estimados no es uniforme en el campo: El mapa de los valores estimados muestra más dispersión en las zonas donde el muestreo es más denso y es más suave en las zonas con escasos datos.
- El rango de los valores estimados suele ser menor que el rango de los valores reales, por lo tanto, el kriging no permite predecir adecuadamente la ocurrencia de valores extremos.

### **2.5.2 Modelo Multi-Gaussiano**

Para hacer frente al desconocimiento geológico en la planificación, una forma de abordar el problema es mediante el uso de modelos numéricos o simulaciones. Éstos tienen como objetivo la caracterización de los valores desconocidos de las variables regionalizadas a través de distribuciones de probabilidad en lugar de estimaciones de los valores (Emery, 2013). Como resultado, se generan variados escenarios geológicos con igual probabilidad de ocurrencia y cada uno con la misma variabilidad espacial que la variable regionalizada real.

En este estudio se utiliza el modelo Multi-Gaussiano por ser el más conocido y de sencilla aplicación. Es un modelo de función aleatoria cuya definición requiere modelar sólo una distribución univariable y un variograma (Emery, 2011).

El modelo posee los siguientes pasos (Letelier, 2012):

1. Usar una función de transformación  $\emptyset$  llamada anamorfosis, que transforma los datos originales  $Z(x)$ , con una cierta distribución, a datos  $Y(x)$  con distribución Gaussiana estándar, según lo indicado en la ecuación.

$$\forall x \in R^d, Z(x) = \emptyset(Y(x))$$

**Ecuación 5: Función de transformación de datos**

2. Efectuar análisis variográficos a los datos transformados.
3. Construir escenarios geológicos a través de alguno de los algoritmos del modelo.
4. Emplear la función inversa, para retornar a las condiciones originales.

En las subsecciones siguientes se describirán los principales algoritmos que utiliza el modelo.

### 2.5.3 Simulación secuencial

En la metodología de simulación secuencial los valores se determinan a través de la ecuación que se presenta a continuación.

$$Y(x_i) = Y^{KS}(x_i) + \sigma_{KS}(x_i) * U_i$$

**Ecuación 6: Simulación secuencial**

Fuente: (Emery, 2013)

Dónde  $Y^{KS}(x_i)$  es el valor obtenido por kriging simple de  $Y(x_i)$  a partir de los valores previamente simulados,  $\{Y(x_1), \dots, Y(x_{i-1})\}$ ,  $\sigma^{SK}(x_i)$  es la desviación estándar de kriging simple y  $U_i$  es una variable Gaussiana estándar independiente de  $\{U_1, \dots, U_{i-1}\}$ .

Es un método sencillo de ejecutar, pero lento en resolución producto de que se van empleando más datos a medida que se desarrolla la simulación. Para hacer frente al problema, en la práctica se utiliza una vecindad móvil para restringir la cantidad de datos a los más cercanos e influyentes en el valor a estimar (Emery, 2013).

### 2.5.4 Bandas rotantes

El método se basa en la simplificación del problema a una dimensión menor. Los datos se determinan desde espacios unidimensionales que se originan de espacios multidimensionales, a través de la siguiente expresión:

$$Y(x) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N Y_i^{(1)}(< x | u_i >)$$

**Ecuación 7: Bandas rotantes**

Fuente: (Emery, 2013)

Dónde  $N$  es la cantidad de datos empleados en el cálculo,  $Y^{(1)}$  es una función aleatoria unidimensional,  $u$  es un vector del espacio multidimensional y  $\langle x | u \rangle$  es la proyección del sitio  $x$  en la recta orientada por  $u$ .

Para efectos de construcción de escenarios condicionales (capaces de reproducir los valores de los datos) se requiere una etapa adicional basada en un kriging simple. Aunque es matemáticamente más complejo, es más rápido que el algoritmo secuencial por 2 razones: el sistema de kriging sólo involucra a los datos originales y se puede condicionar múltiples realizaciones con un solo kriging (Emery, 2011). Como resultado se tiene una simulación que reproduce exactamente el variograma deseado.

## 2.6 Incertidumbre de precios

Para considerar la variabilidad del precio de los metales, se han desarrollado múltiples modelos, tanto de corto como de largo plazo. Dentro de los modelos de largo plazo que permiten el uso de flujos de caja descontados se reconocen los modelos a exponer en las subsecciones siguientes.

### 2.6.1 Modelos estocásticos

A partir de un modelo basado en el comportamiento histórico de mercado se predice la tendencia del precio en el futuro. Los procesos más utilizados son el movimiento geométrico browniano (GBM) y la reversión a la media (MRP) (Azimi, et al., 2013), presentes en la Ecuación 8 y la Ecuación 9.

$$dP = \alpha P dt + \sigma P dz$$

**Ecuación 8: Movimiento geométrico Browniano**

Fuente: (Schwartz, 1997)

$$dP = \eta(\ln \bar{P} - \ln P) P dt + \sigma P dz$$

**Ecuación 9: Reversión a la media**

Fuente: (Schwartz, 1997)

Dónde  $\alpha$  representa la tendencia esperada,  $P$  el precio actual del metal,  $\sigma$  la volatilidad,  $dt$  y  $dz$  el incremento del tiempo y del proceso estándar de Wiener, respectivamente y  $\eta$  la velocidad a la cual se alcanza el precio de equilibrio a largo plazo,  $\bar{P}$ .

Una ventaja de los métodos estocásticos es que los parámetros pueden ser fácilmente estimados con datos históricos (Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011). El único parámetro que requiere otro método de cálculo es el incremento del proceso de Wiener. Una alternativa sencilla para su obtención involucra el uso de la Ecuación 10, dónde se requiere que los intervalos de tiempo sean a lo sumo mensuales.

$$dz = \varepsilon * \sqrt{dt}$$

**Ecuación 10: Cálculo de incremento del proceso Wiener**

Fuente: (Mascareñas, 2013)

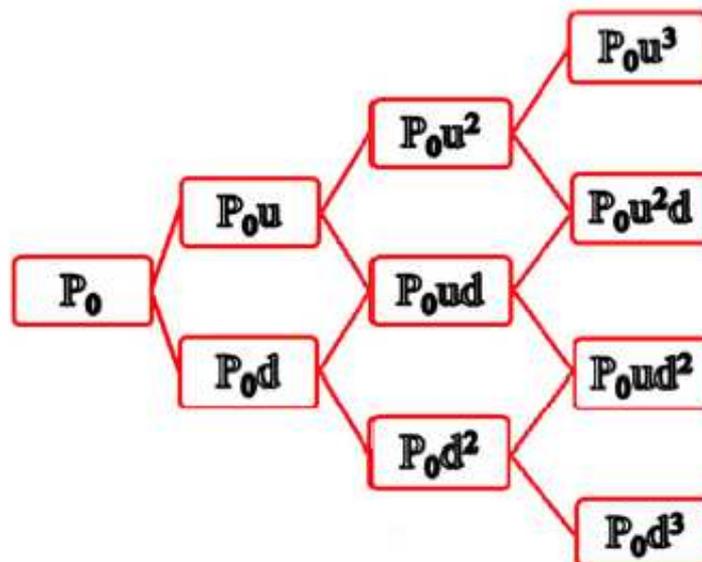
Dónde  $\varepsilon$  es una variable aleatoria normalmente distribuida con media nula y desviación estándar igual a 1 y  $dt$  es el incremento del tiempo.

También se puede considerar una desventaja el hecho de emplear como fundamento la información histórica, ya que no pronostica los posibles cambios en el comportamiento de mercado ni se adecua a historiales complejos de los datos, como por ejemplo, la existencia de superciclos.

Generalmente, el GBM es adecuado para las variables que exhiben una tendencia constante, como son el precio de los metales preciosos, mientras que el MRP es apropiado para modelar variables que tienen un nivel de equilibrio a largo plazo, como los precios de los metales base (Schwartz, 1997; Azimi, et al., 2013).

### 2.6.2 Árbol binomial

La incertidumbre del precio se reduce a movimientos discretos binomiales (Cox, et al., 1978). En lugar de una ecuación que exprese la variabilidad del precio, se establecen las probabilidades de que el precio varíe. Existen 2 opciones de comportamiento para éste: aumentar  $u$  veces su valor o disminuirlo  $d$  veces, con probabilidades  $pr$  y  $(1-pr)$ , respectivamente. En cada período modelado, se tendrá la misma probabilidad y tendencias en aumento o disminución del precio. La Figura 7 esquematiza la situación, en la cual  $P_0$  representa el precio que permite iniciar el modelamiento.



**Figura 7: Árbol de precio binomial**

Fuente: (Dehghani & Ataee-pour, 2012)

Para cuantificar  $u$ ,  $d$  se establecen las siguientes ecuaciones:

$$u = e^{\sigma\sqrt{dt}}$$

**Ecuación 11: Magnitud del aumento en el valor del precio**

Fuente: (Cox, et al., 1978)

$$d = e^{-\sigma\sqrt{dt}} = \frac{1}{u}$$

**Ecuación 12: Magnitud de la disminución en el valor del precio**

Fuente: (Cox, et al., 1978)

$$p_r = \frac{(1 + Rf) - d}{u - d}$$

**Ecuación 13: Probabilidad de aumento del valor del precio**

Fuente: (Cox, et al., 1978)

Dónde  $\sigma$  representa la volatilidad del precio,  $Rf$  la tasa libre de riesgo y  $dt$  el incremento del tiempo.

Es un método simple en términos matemáticos que se basa en el supuesto de no arbitraje. Dicho supuesto implica que toda inversión libre de riesgo obtiene la misma tasa de retorno y existe la oportunidad de no invertir, la cual requiere cero dólares de inversión pero produce retornos positivos (Darden, s.f.).

La cantidad de escenarios posibles de construir se puede cuantificar a partir del número de escenarios ( $n$ ) y corresponde a  $2^{n-1}$ . No es una herramienta adecuada si se requieren variados escenarios de precios para un breve horizonte de planificación.

### 3 Capítulo: Metodología de resolución

#### 3.1 Descripción general

La metodología que compete a la resolución de la problemática en estudio se conforma en base a las etapas señaladas en la Figura 8.

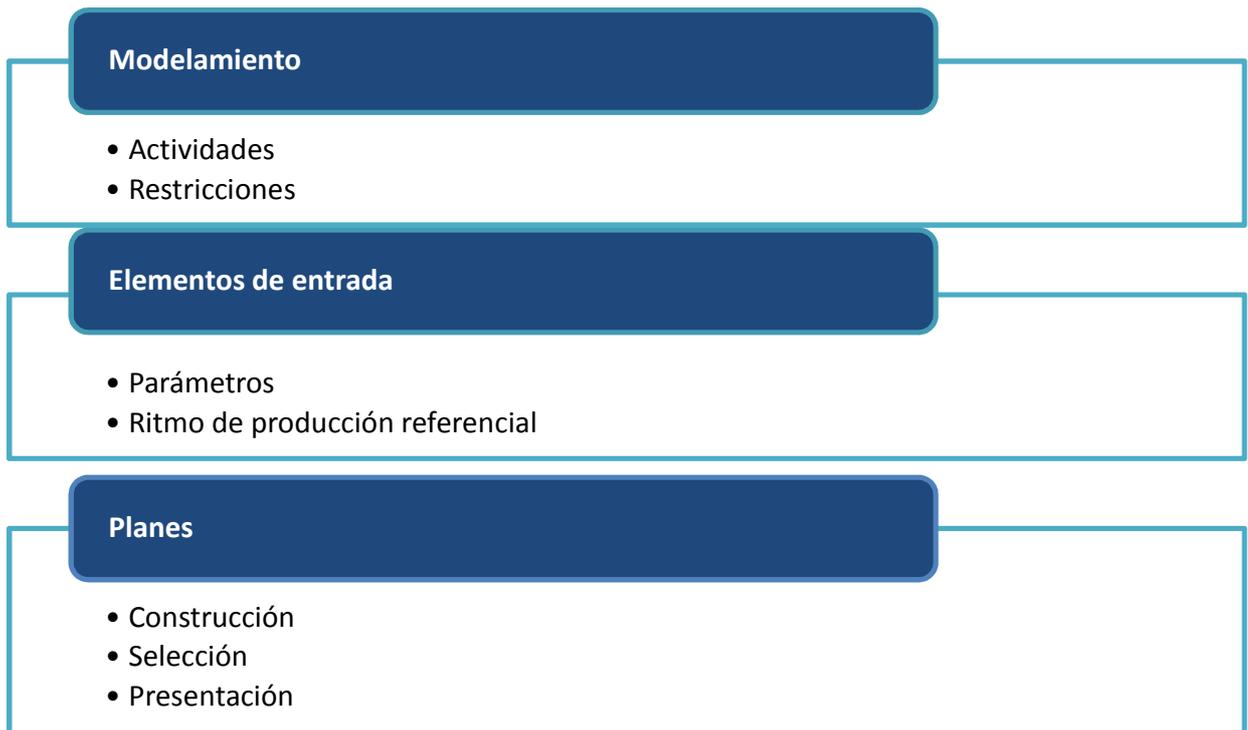


Figura 8: Metodología de trabajo

La primera fase de la metodología dice relación con la comprensión del problema dado los antecedentes que se exponen en el capítulo previo, en particular la descripción de la herramienta a utilizar. Los conceptos que se exponen en 2.3 se emplean para esquematizar la situación en un problema de optimización.

Posteriormente, se definen los elementos de entrada al modelo. El proceder se resume en dos conceptos: Definición de parámetros y calibración del ritmo de producción referencial.

Una vez que se obtienen los elementos de entrada, se determinan los planes y se seleccionan aquellos que indiquen un mayor atractivo a ser ejecutados. Éstos se presentan en una modalidad que permita guiar al planificador en la decisión de elegir un único plan.

### 3.2 Modelamiento del problema

A nivel de la lógica de UDESS, la minería a cielo abierto se enmarca en la gestión de destino de las actividades que es capaz de reportar el mayor beneficio para la operación. En consecuencia, la decisión referente al destino a asignar a una actividad se efectúa a partir del cálculo del beneficio de la actividad y los criterios de selección expuestos en la Figura 9.

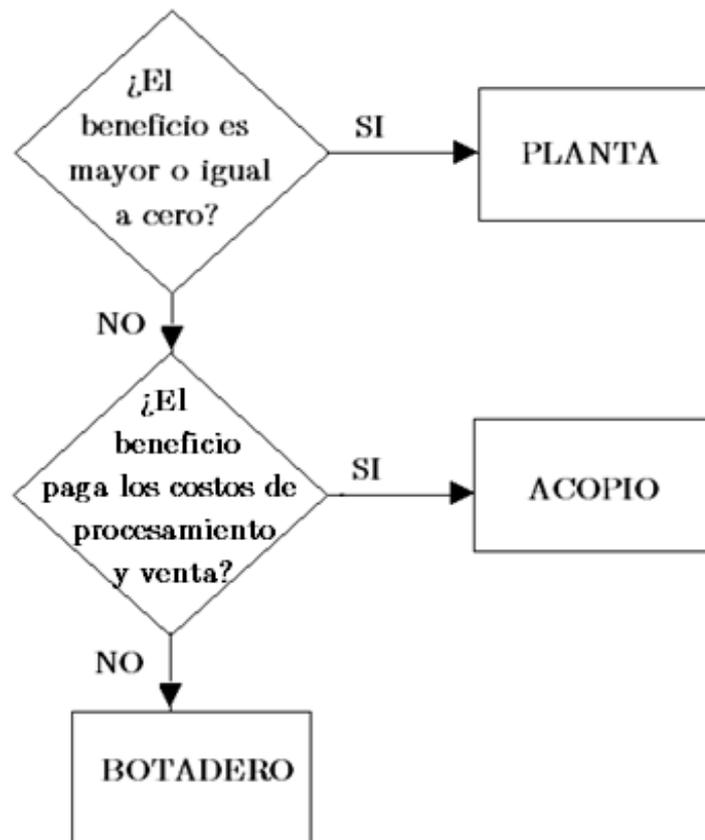


Figura 9: Criterio de selección de destino

La expresión matemática del beneficio se presenta en la Ecuación 14.

$$B = (P - C_{fyr}) * R * m * l - C_p * m - C_m * m$$

Ecuación 14: Beneficio

Fuente: (Rubio, 2009)

Dónde P representa el precio del metal,  $C_{fyr}$  el costo de fundición y refinamiento, R la recuperación, m el tonelaje de la unidad de extracción, l la ley,  $C_p$  el costo planta y  $C_m$  el costo mina.

### 3.2.1 Actividades

Las actividades se definen en términos de unidades de masa a ser extraídas y/o procesadas.

Las unidades de extracción se refieren a los bancos que se originan del rajo. Cada banco se divide en 3 fracciones, como se indica en la Figura 10.

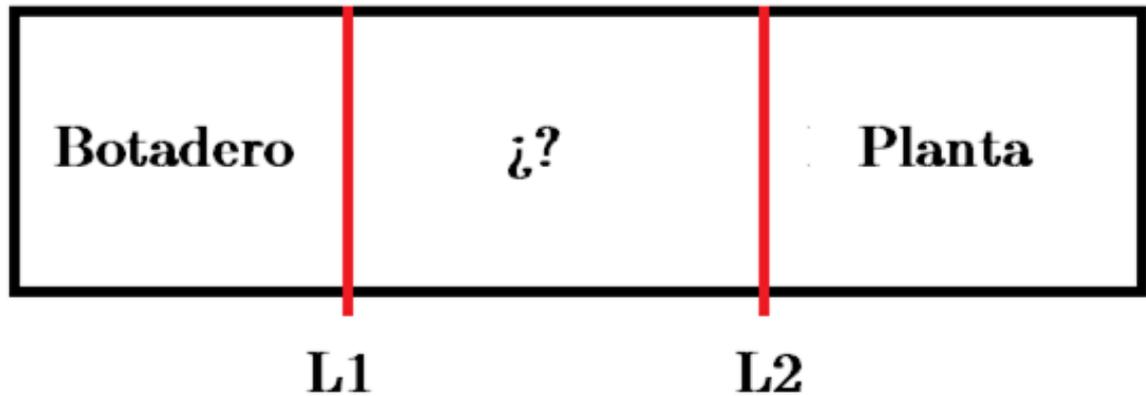


Figura 10: Fracciones por destino

Se tiene establecido el destino de toda fracción que posea una ley bajo L1 y por sobre L2, siendo éstos botadero y planta, respectivamente. Si se considera incertidumbre de precios, dichas leyes corresponden a los casos más extremistas: L1 se calcula para el precio más alto y L2 para el precio más bajo.

Por su parte, las fracciones de la unidad de extracción que posean leyes intermedias al intervalo señalado no tienen un destino claro, ya sea por restricciones de mercado o por condiciones propias de la mina. Para hacer frente al problema del destino, cada una de estas fracciones se representa a través de una actividad *dummy*, la que a su vez se define por actividades composicionales que aluden a los posibles destinos.

En cuanto a las unidades de procesamiento, éstas corresponden a aquellas que tienen como destino la planta. Sólo resta incorporar una combinación de destinos posible: envío de acopio a planta. Se define una nueva actividad que posee los costos de remanaje y procesamiento del stock y los ingresos de su venta. No se incluye el costo mina puesto que se asignan a la actividad representativa de envío del rajo a acopio.

### 3.2.2 Restricciones

Dentro de las restricciones a las que están sujetas las actividades, junto con las asociadas al uso de UDESS, se incluyen las siguientes:

- *Extracción banco a banco*: Busca asegurar la existencia de espacio operacional y simplificar el proceder que involucra esta decisión.

- *Capacidades mina y planta constantes*: Con el objeto de tener el mayor provecho y uso responsable de los recursos de la mina, tanto materiales como de capital.
- *Envío de stock a planta*: Dice relación con asegurar la existencia de stock. La actividad asociada al envío de stock desde el acopio a la planta sólo puede iniciarse si previamente se ha iniciado la actividad de envío de mineral marginal desde el rajo al acopio.

### **3.3 Definición de parámetros**

Los parámetros que se busca definir son: Escenarios de precios, escenarios geológicos y tasa de descuento, ya que corresponden a aquellos que representan la incertidumbre tanto en el secuenciamiento como en el valor del proyecto.

Para efectos de la estimación de precios se emplea el modelo de reversión a la media, producto de que la información empleada para el modelamiento (a presentar en el próximo capítulo) muestra un valor de equilibrio en el largo plazo, hecho que se ajusta de mejor manera a lo señalado por este método.

Por otro lado, en la estimación de escenarios geológicos no se reconocen indicios de que un algoritmo reporte mejores estimaciones respecto a otro, teniendo en consideración las condiciones del caso de estudio. Se elige el algoritmo de bandas rotantes únicamente por motivos de rapidez en la ejecución de las estimaciones.

Respecto a la tasa de descuento, se emplean las ecuaciones (Ecuación 3 y Ecuación 4) expuestas en 2.4.2, referentes a su cálculo.

La construcción de escenarios a secuenciar, entendidos como una combinación de  $m$  escenarios de precios y  $n$  escenarios geológicos, requiere de una previa calibración de  $m$  y  $n$  con el fin de asegurar la adecuada representatividad de la incertidumbre. El número de escenarios no considera el cruce de éstos (es decir,  $m*n$  casos), sino la asociación de un escenario de precio a un escenario geológico. La decisión se sustenta en la teoría de probabilidad, de la cual se deduce que el cruce de los escenarios no aporta mayor información respecto al efecto de la incertidumbre en los planes producto de que los dos elementos que componen los escenarios son independientes.

### **3.4 Calibración del ritmo de producción referencial**

Se busca modelar planes para cada escenario en estudio, hecho que puede conllevar a la creación de múltiples ritmos de producción en una mina y planta que admite una única configuración de ritmos óptimos para el buen uso de los diseños.

Con el objetivo de reducir la variabilidad posible en el ritmo de los planes, previo a su construcción se inicia la definición de un intervalo de movimientos que sea posible alcanzar con todos los escenarios en consideración. Este intervalo se nombra ritmo de producción referencial.

Para establecer el ritmo de producción referencial, se implementa el siguiente protocolo:

1. Establecer los límites mínimos y máximos de movimiento.
2. Obtener k escenarios al azar.
3. Implementar el modelo de optimización en las k muestras.
4. Analizar los planes de producción de las k muestras y redefinir los límites a un intervalo más acotado, que sea posible de implementar en todas las muestras.
5. Iterar desde el paso 2, con los nuevos límites establecidos. Efectuar el proceso hasta que el planificador estime que el intervalo está lo suficientemente acotado.

En el protocolo señalado en el párrafo anterior, puede ocurrir que al iterar el modelo encuentre un escenario que no es factible con los nuevos límites. En dicho caso, se tienen 2 opciones: Ser menos restrictivo en la redefinición efectuada en el paso 4 y probar otra configuración, o bien, definir que el intervalo previo es lo suficientemente acotado y no volver a iterar.

Cuando se obtenga un intervalo aceptable, éste se debe validar. Se debe probar que efectivamente sea factible en todos los escenarios en estudio.

### **3.5 Construcción de planes**

Una vez que se valida el ritmo de producción referencial, se efectúa la construcción de planes con el movimiento mina y planta constantes, dentro de lo posible. El protocolo del proceso es el siguiente:

1. Obtener 1 escenario al azar entre aquellos que no poseen plan.
2. Ajustar los movimientos mina y planta a la condición deseada.
3. Probar la configuración en el resto de los escenarios. Si se tiene un escenario con 2 configuraciones aceptables, se elige el plan que tenga asociado el mayor valor presente neto.
4. Iterar desde el paso 1. Se concluye el proceso cuando todos los escenarios tengan un plan.

Como elementos de salida del problema de optimización se tendrán planes óptimos para cada escenario evaluado.

### **3.6 Selección de planes**

Debido a que no se sabe con certeza el escenario geológico y de precios que se tendrá en la mina, no es posible simplemente implementar el plan construido a partir de dicha configuración. Más aún, todas las configuraciones, con sus respectivos planes, presentan diferencias significativas en materias de inversiones, recursos, metas, entre otras, con el riesgo latente de que la elección de plan no sea el adecuado a las condiciones reales de la mina.

Desde esta perspectiva, es fundamental tener un buen fundamento para la selección de un plan y nace la necesidad de presentar algún criterio que permita la toma de decisiones.

Como factor más relevante se contempla la constancia en el procesamiento que efectúa la planta, en favor de mantener una buena producción dentro de la mina. Así, los criterios a considerar son:

- Criterio I: Movimiento planta constante durante cada período secuenciado
- Criterio II: Movimiento de la planta acumulado constante en el horizonte de un año

Los planes se implementan en cada escenario estudiado y se evalúan en términos de su capacidad para cumplir los criterios señalados. Para efectuar la comparación y hacer la selección, se define como indicador el índice de factibilidad según lo expresado en la Ecuación 15.

$$IF = \frac{\# \text{Escenarios factibles}}{\# \text{escenarios}}$$

**Ecuación 15: Índice de factibilidad**

Se considera que el escenario es factible si es capaz de cumplir con el criterio establecido al analizar el plan. Aquellos planes con mayor índice de factibilidad se consideran de menor riesgo para la operación y, por tanto, serán los selectos.

### **3.7 Presentación de planes**

Para efectos de presentación de planes, se contemplan 2 conceptos relevantes que permiten definir el formato de presentación de planes:

- Evaluación económica: Ya que los proyectos mineros buscan retornos positivos y la optimización se efectúa con el objetivo de maximizar la valorización económica, el formato de presentación corresponde a un histograma que muestra las frecuencias de VPN dados los escenarios existentes.
- Ritmos de producción: Se ha enfatizado la relevancia de mantener constancia en los ritmos. En efecto, se incluye en la metodología una etapa de calibración con foco en acotar su rango de variabilidad. Para hacer tangible cuan variantes son los ritmos, éstos se exponen.

## 4 Capítulo: Elementos de entrada

### 4.1 Caso de estudio

Para efectos de estudio, se utilizan los sondajes de exploración de Andina Sur-Sur. Corresponden a 2.376 datos, en los cuales se cuantifica la ley de cobre y el posicionamiento en 3 direcciones: Este, Norte y Cota. Si bien el modelo no presenta densidad, ésta se asume de  $2,6 \text{ [t/m}^3\text{]}$ .

La curva tonelaje-ley y la estadística básica asociada a la ley de cobre se presentan en la Figura 11 y en la Tabla 1.

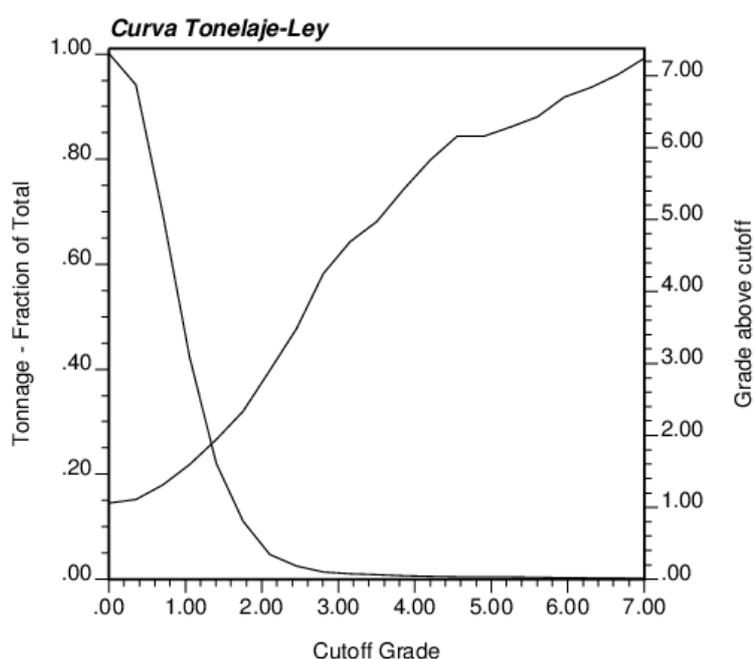


Figura 11: Curva tonelaje-ley del caso de estudio

Tabla 1: Estadística básica de los sondajes de exploración

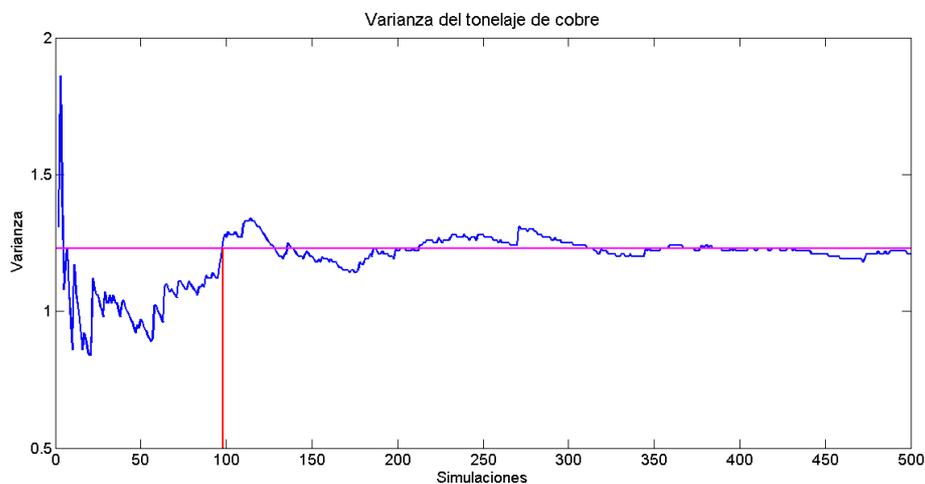
Parámetro	Valor
Mínimo [%]	0,12
Máximo [%]	7,24
Promedio [%]	1,05
Desviación estándar	0,64

### 4.2 Estimación de leyes

En la estimación de escenarios geológicos se construye un modelo con bloques de 10[m] en todas las direcciones.

Para la definición del número de escenarios, se efectúan 500 simulaciones de escenarios de precios y se analiza la varianza del tonelaje de cobre, dada la incorporación de un escenario. Debido a que

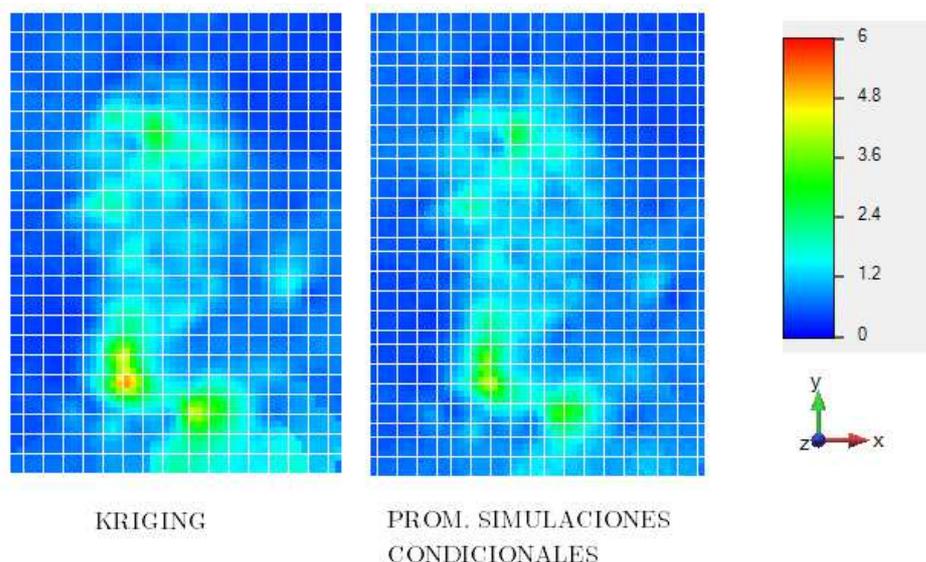
la raíz de la aleatoriedad y la semilla en el modelo de bandas rotantes implementado son únicas, sólo se ejecuta una réplica de las 500 simulaciones. La Figura 12 presenta el resultado.



**Figura 12: Varianza del tonelaje de cobre en la realización de 500 simulaciones**

Las simulaciones tienden a estabilizarse en la varianza de valor 1,23. Se considera que en la ejecución de la simulación 98 la curva muestra una estabilización aceptable en torno a ese valor y al menor número de muestras posible, para efectos de acotar los tiempos de resolución del problema. Luego, se emplean 98 escenarios geológicos en el estudio.

A modo de validación de las simulaciones, se muestra en la Figura 13 la vista en planta del promedio de ley de las simulaciones condicionales respecto a la ley calculada por kriging, sujetos a la misma escala de colores. Si bien se observa cierta tendencia a concentrar leyes mayores en el kriging, se reconoce una semejanza aceptable entre las figuras.



**Figura 13: Vista en planta de las leyes estimadas por kriging y el promedio de las simulaciones condicionales**

La Figura 14 presenta los gráficos representativos de la ley media y el tonelaje de finos asociados a las simulaciones.

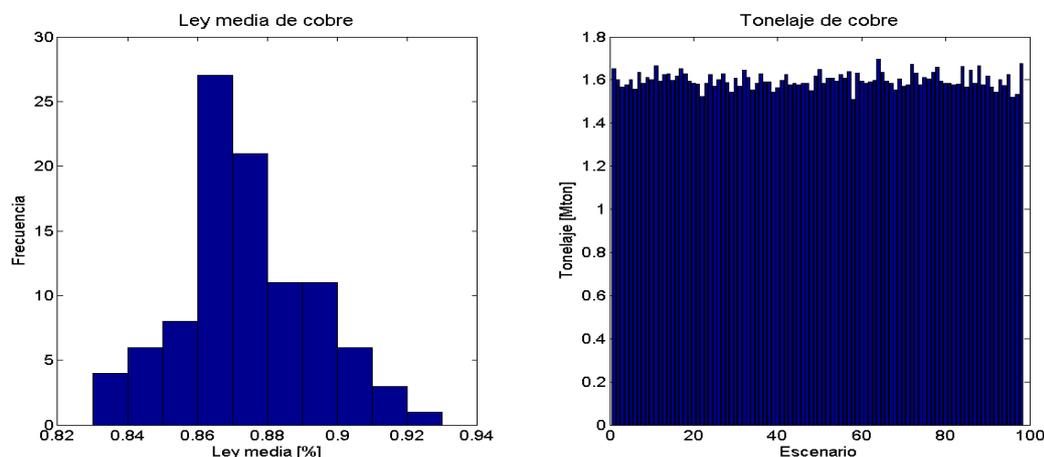


Figura 14: (Izq.) Histograma de la ley media (Der.) Finos de cobre por escenario geológico

### 4.3 Estimación de precios

En el modelamiento se utilizan los antecedentes señalados en la Tabla 2.

Tabla 2: Predicción del precio del cobre

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018 (LP)
Precio [US\$/lb]	3,32	3,18	3,17	3,19	3,20	3,32

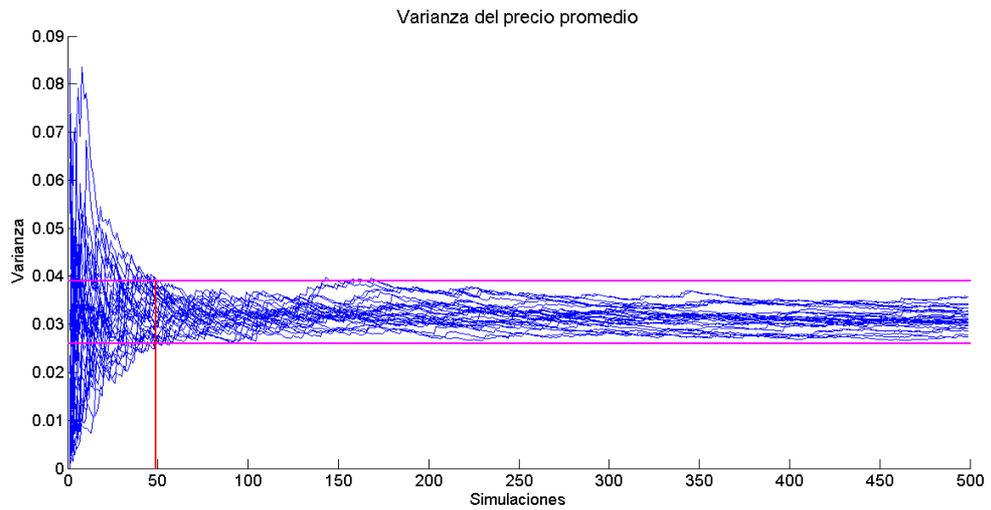
Fuente: (Knoema, 2014)

Los datos indican que el precio del año 2018 corresponde al precio de equilibrio de largo plazo, en vista de su concordancia con el precio del año 2013. Por tanto es plausible el uso del modelo de reversión a la media. Tras establecer la condición, restan 5 años para alcanzar la condición de equilibrio, valor que corresponde al inverso de la velocidad.

El pronóstico permite inferir una baja volatilidad en el precio de 2014 a 2017, con un aumento a final del período en estudio. Se ajustan los valores de la volatilidad en concordancia con la condición descrita.

Para la definición del número de escenarios a ejecutar, nuevamente se procede a efectuar un total de 500 simulaciones, en esta ocasión de escenarios de precios. Se evalúa la varianza del valor medio del precio, dada la incorporación de un escenario.

La Figura 15 presenta la variabilidad para 30 réplicas.

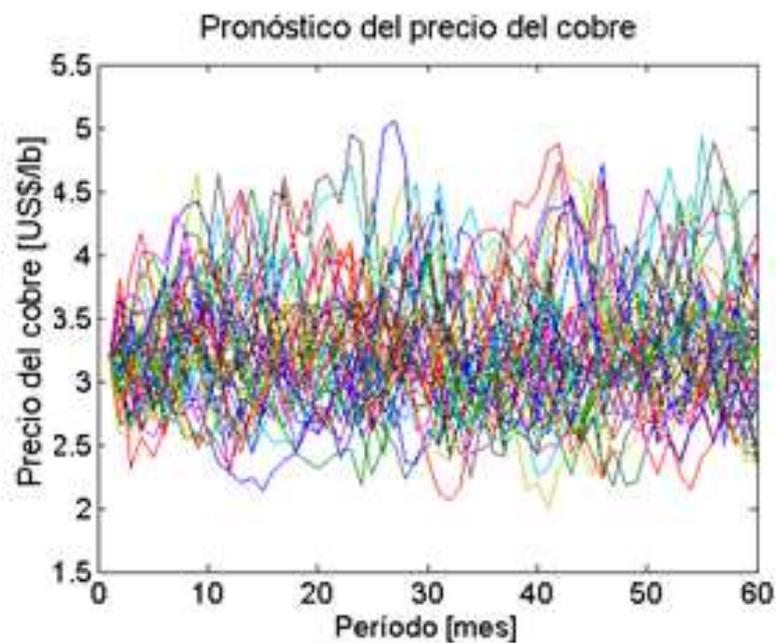


**Figura 15: Varianza del valor medio del precio en la realización de 500 simulaciones**

Se observa que la varianza de los datos ronda aproximadamente entre 0,025 y 0,04 en el momento en que se estabiliza. Se define ese intervalo como límite aceptable de variabilidad, de manera que se estima que el número de escenarios aceptable se encuentra en torno a las 50 simulaciones.

Debido a que previamente se estimó la ejecución de 98 escenarios geológicos, se decide seleccionar 49 como el número de escenarios de precios. De esta manera, se tienen 2 escenarios geológicos por cada escenario de precios.

La gráfica representativa de la estimación de precios se despliega a continuación.



**Figura 16: Realizaciones de escenarios de precios del cobre**

Para efectos de reducir los tiempos de simulación se considera el uso de precios trimestrales. La Figura 17 expone los precios a emplear en el caso de estudio, derivados del pronóstico de precios.

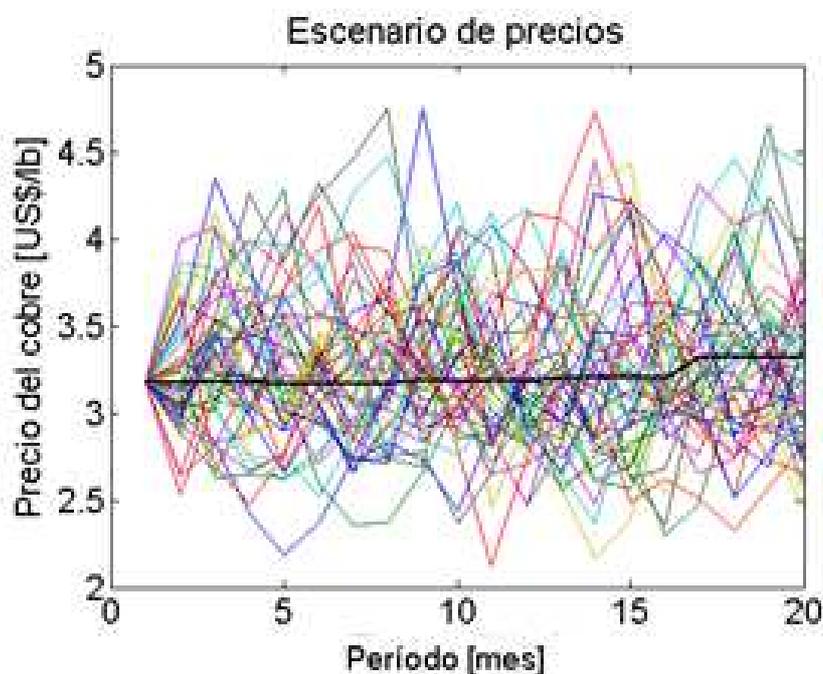


Figura 17: Precios de cobre del caso de estudio

#### 4.4 Definición de tasa de descuento

Los elementos a emplear en los cálculos se enlistan en la Tabla 3.

Tabla 3: Elementos para cálculo de la tasa de descuento

Parámetro	Valor	Fuente
Tasa libre de riesgo [%]	2,99	(Ministerio de Hacienda, 2010)
Prima por riesgo [%]	5,90	(Damodaran, 2014)
Riesgo sistemático	1,18	(Giddy, 2008)
Tasa de deuda financiera [%]	2,40	(CODELCO, 2014)
Tasa de impuesto a las ganancias [%]	20,00	(KPMG, 2014)

Además, se asume que 80% del proyecto se financia con capital propio y 20% por deuda. De este modo, se obtiene lo siguiente de las ecuaciones:

$$k_s[\%] = 2,99 + 1,18 * 5,9 = 10$$

$$WACC[\%] = 0,2 * (1 - 0,2) * 2,4 + 0,8 * 10 = 8,3$$

#### 4.5 Calibración del ritmo de producción

La calibración del ritmo de producción se efectúa manualmente a través del análisis de resultados de planes preliminares, sujetos a las condiciones de la iteración. A partir de la observación de las

tendencias en el comportamiento de los ritmos de producción de 4 a 5 escenarios selectos al azar, se estima la magnitud de las modificaciones que son capaces de soportar los escenarios en virtud de reducir la brecha entre los máximos y mínimos. Así, los resultados de las iteraciones del primer protocolo se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4: Iteraciones del primer protocolo**

<b>Iteración</b>	<b>Mínimo movimiento mina [ton/mes]</b>	<b>Máximo movimiento mina [ton/mes]</b>	<b>Mínimo movimiento planta [ton/mes]</b>	<b>Máximo movimiento planta [ton/mes]</b>
1	600.000	12.000.000	300.000	4.500.000
2	630.000	3.000.000	600.000	2.100.000
3	900.000	2.100.000	600.000	1.200.000
4	1.050.000	1.800.000	630.000	900.000
5	1.200.000	1.500.000	750.000	900.000

## 5 Capítulo: Resultados

### 5.1 Construcción de planes

Se construyen planes con ritmos de producción constantes en el horizonte de planificación. La Tabla 5 expone los movimientos mina<sup>3</sup> y planta<sup>4</sup> que se obtienen al implementar el segundo protocolo y la cantidad de escenarios que emplean dicha configuración. Además, para evaluar el uso de los stocks, se incluyen 2 columnas que especifican la cantidad de escenarios en los cuales se envía mineral a la planta desde el stock de acopio y la tasa de envío de stock a planta, definida como la razón entre las toneladas de mineral procesadas en la planta que se originan de stock y las toneladas de mineral procesadas en la planta, ambas respecto al total de escenarios en la configuración.

La visualización gráfica de los ritmos de producción se presentan en el Anexo A.

Tabla 5: Resumen de resultados de la configuración del secuenciamiento

Configuración	Movimiento mina [ton/mes]	Movimiento planta [ton/mes]	Número de escenarios	Número de escenarios con envío de stock	Tasa de envío de stock a planta
1	1.500.000	870.000	36	16	$6,51*10^{-3}$
2	1.500.000	840.000	5	3	$9,69*10^{-3}$
3	1.440.000	900.000	35	18	$6,35*10^{-3}$
4	1.380.000	810.000	15	7	$5,86*10^{-3}$
5	1.350.000	840.000	5	1	$1,72*10^{-4}$
6	1.290.000	840.000	1	1	$5,09*10^{-3}$
7	1.200.000	750.000	1	0	0

No se reconocen altas tasas de envío de stock a planta. Incluso, se tienen configuraciones donde no se evidencia su uso en la planta. El comportamiento se explica por el efecto de la tasa de descuento en la valorización económica: Debido a su influencia, el valor de un proyecto mejora si se envían las mejores leyes en los años tempranos y las más bajas en períodos posteriores. En otras palabras, es más rentable para un proyecto el envío directo de mineral a planta que el de stock, producto de sus leyes más altas. En vista de que se tiene mineral suficiente para alimentar a la planta al ritmo acordado, el stock no se procesa y se almacena para procesarlo en períodos posteriores, generalmente en el final del LOM.

<sup>3</sup> Se entiende por movimiento mina al envío de material desde el rajo hacia a alguno de los posibles destinos: Planta, botadero o acopio.

<sup>4</sup> Se entiende por movimiento planta al mineral que es procesado en ésta. Así, corresponde al mineral que es enviado a planta desde el rajo o el acopio.

Las configuraciones donde se evidencia mayor actividad de envío de stock a planta son aquellas que presentan mayores capacidades de planta. La observación es consecuente con lo señalado en el párrafo anterior.

## 5.2 Selección de planes

Producto de las diversas distribuciones de leyes, es poco probable que se generen los movimientos exactos de material asociados a la configuración de una secuencia. Por lo tanto, las secuencias difícilmente serán factibles en un escenario que no sea el propio que la originó y el indicador pierde utilidad. Para garantizar la posible selección de secuencias, se define una tolerancia de 92% para el cumplimiento de los criterios expuestos en 3.6.

La Figura 18 y la Figura 19 presentan los valores del índice de factibilidad para cada criterio.

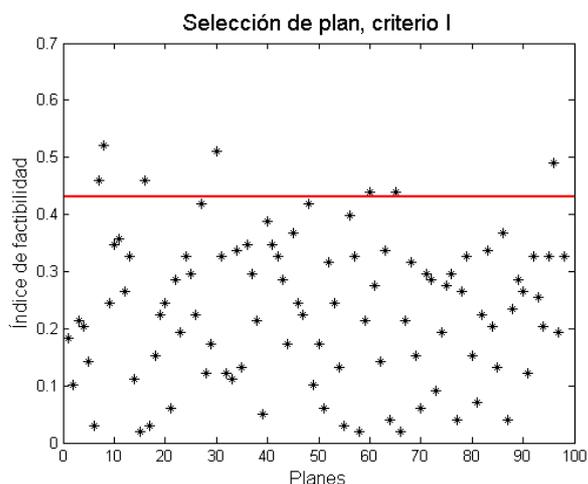


Figura 18: índice de factibilidad según criterio I

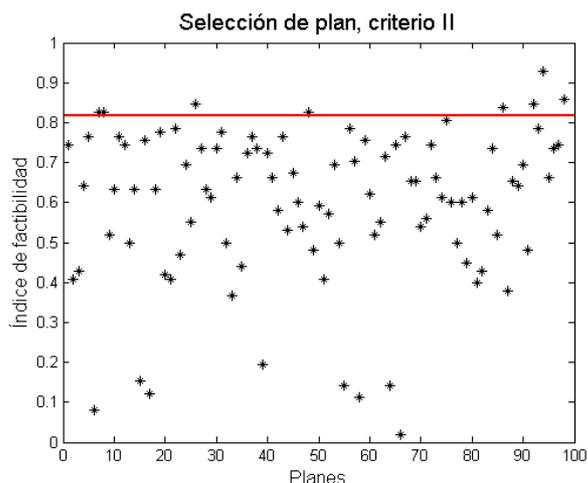


Figura 19: índice de factibilidad según criterio II

Se observa una gran diferencia en los valores del índice, dependiendo del criterio que se aplique. Es por ello que se definen distintos límites aceptables del índice de factibilidad para la selección de secuencias. Se establece que un plan se selecciona si su índice de factibilidad es mayor que 0.43 en el caso del criterio I y mayor a 0.82 para el criterio II.

La justificación de las diferencias en el valor del índice de factibilidad para un mismo plan se liga al nivel de exigencia del criterio. Si bien ambos criterios se refieren al movimiento planta, la mayor exigencia se reconoce en el horizonte temporal que define su cumplimiento o fallo: Al poseer mayores intervalos de tiempo, el segundo criterio permite mayores flexibilidades. Por ejemplo, permite la existencia de períodos con falencias en el procesamiento de la planta dentro de un año, mientras se compensen y se logren alcanzar las metas anuales de procesamiento.

### 5.3 Evaluación económica

Como primer elemento de presentación de planes, se considera el uso del valor presente neto (VPN). Para ello, se expone el histograma de VPN asociado a la ejecución del plan.

Cabe destacar que para su cálculo no se considera la inversión asociada al proyecto.

#### 5.3.1 Producción constante trimestral

A continuación se presentan los histogramas de los planes que en promedio reportan las mejores evaluaciones económicas.

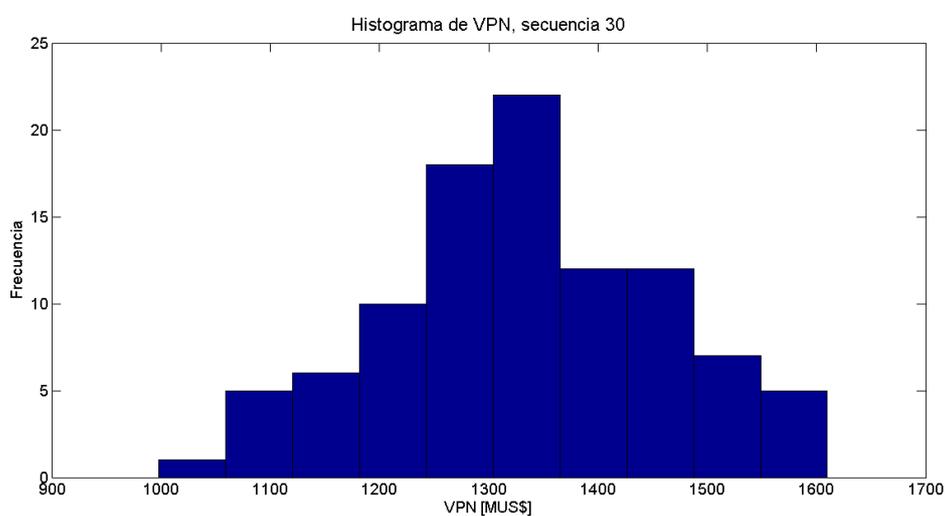
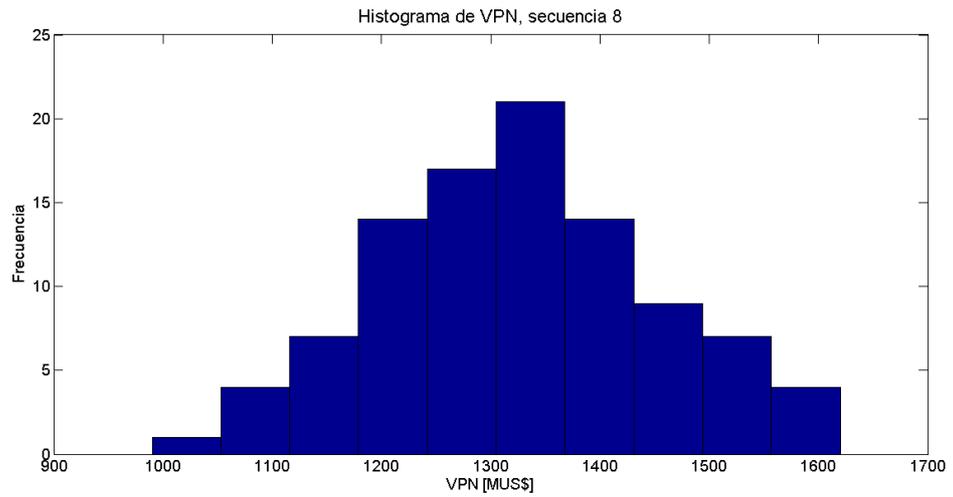
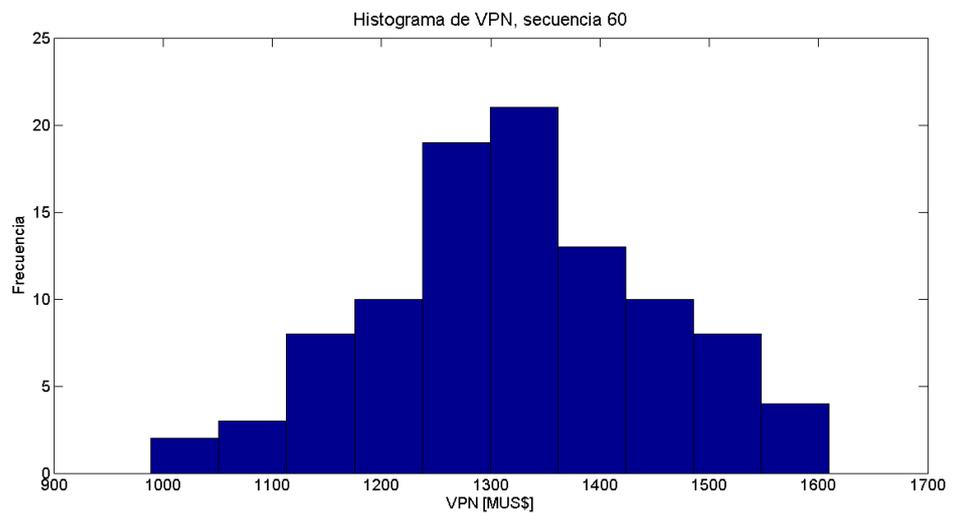


Figura 20: Histograma de VPN, secuencia 30



**Figura 21: Histograma de VPN, secuencia 8**



**Figura 22: Histograma de VPN, secuencia 60**

Los histogramas fluctúan entre los 1.000 y 1.600 millones de dólares [MUS\$] y las mayores frecuencias se concentran en torno a las 1.300 [MUS\$].

La Tabla 6 muestra la estadística básica de los escenarios selectos por el criterio I.

**Tabla 6: Estadística básica del VPN de los planes selectos por criterio I**

Secuencia	Máximo VPN [MUS\$]	Mínimo VPN [MUS\$]	VPN promedio [MUS\$]
30	1.607	998	1.331
8	1.618	990	1.325
60	1.612	989	1.321
16	1.598	994	1.318
7	1.593	987	1.316
65	1.587	975	1.308
96	1.585	971	1.302

Los histogramas de los restantes escenarios selectos se presentan en el anexo B1.

### 5.3.2 Producción constante anual

Los histogramas siguientes muestran los planes que reportan las mejores evaluaciones económicas en promedio.

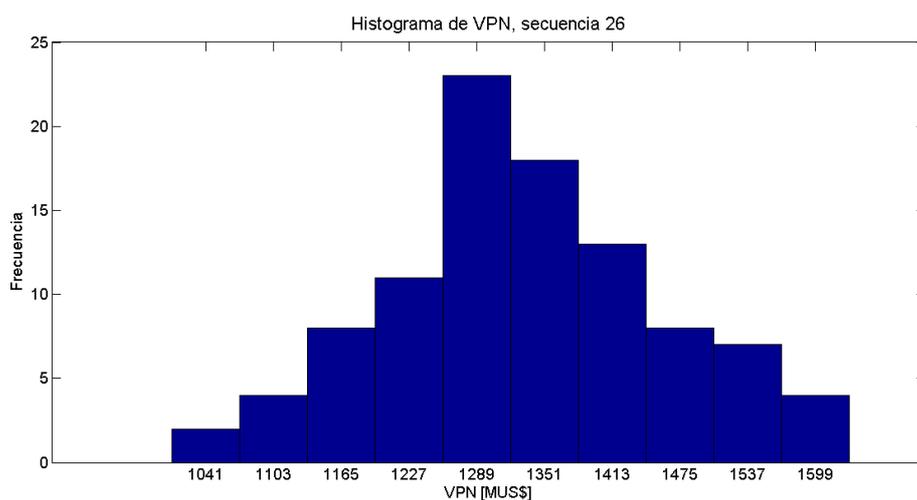


Figura 23: Histograma de VPN, secuencia 26

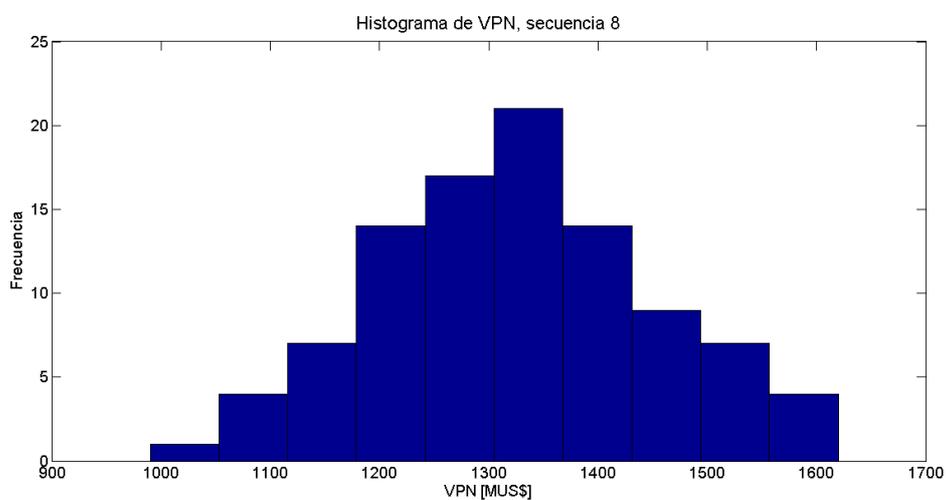
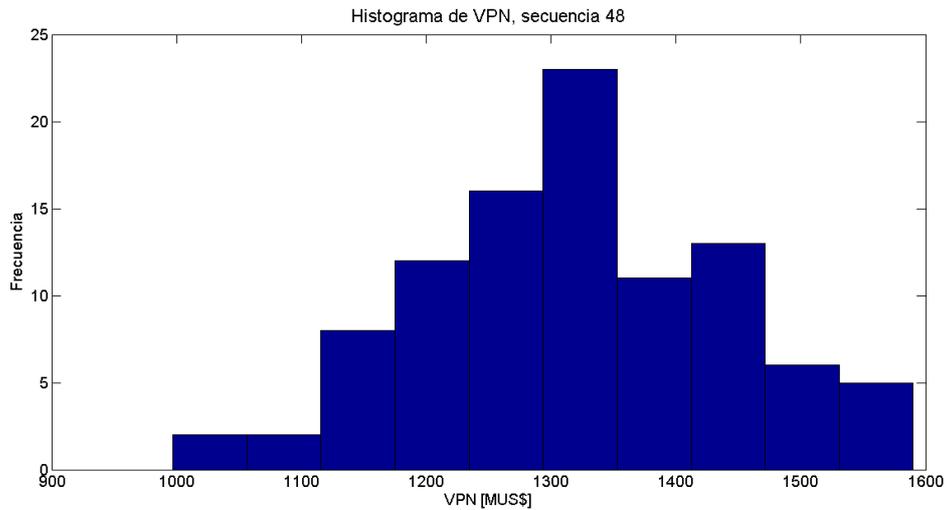


Figura 24: Histograma de VPN, secuencia 8



**Figura 25: Histograma de VPN, secuencia 48**

La Tabla 7 muestra la estadística básica de los escenarios selectos por criterio II.

**Tabla 7: Estadística básica del VPN de los planes selectos por criterio II**

Secuencia	Máximo VPN [MUS\$]	Mínimo VPN [MUS\$]	VPN promedio [MUS\$]
26	1.626	1.009	1.333
8	1.618	990	1.325
48	1.593	997	1.320
7	1.593	987	1.316
86	1.588	987	1.315
94	1.534	967	1.265
98	1.512	946	1.256
92	1.473	907	1.203

En general se observa un descenso en el VPN promedio respecto al criterio anterior. Sin embargo, la secuencia 26, selecta únicamente por el criterio II, reporta la mejor evaluación económica en el global de los escenarios selectos, tanto en términos promedios como en el intervalo donde fluctúan los valores extremos.

Los histogramas de los restantes escenarios selectos se presentan en el anexo B2.

## 5.4 Ritmos de producción

En la segunda instancia de presentación de planes, se muestran los ritmos de producción asociados a las secuencias.

Se debe tener en consideración que se incluye el movimiento mina. A este se le establece también una tolerancia, con el objetivo de incluir en la presentación los desvíos relevantes de los planes.

### 5.4.1 Producción constante trimestral

A continuación se presentan los ritmos de las 3 secuencias con mayor índice de factibilidad.

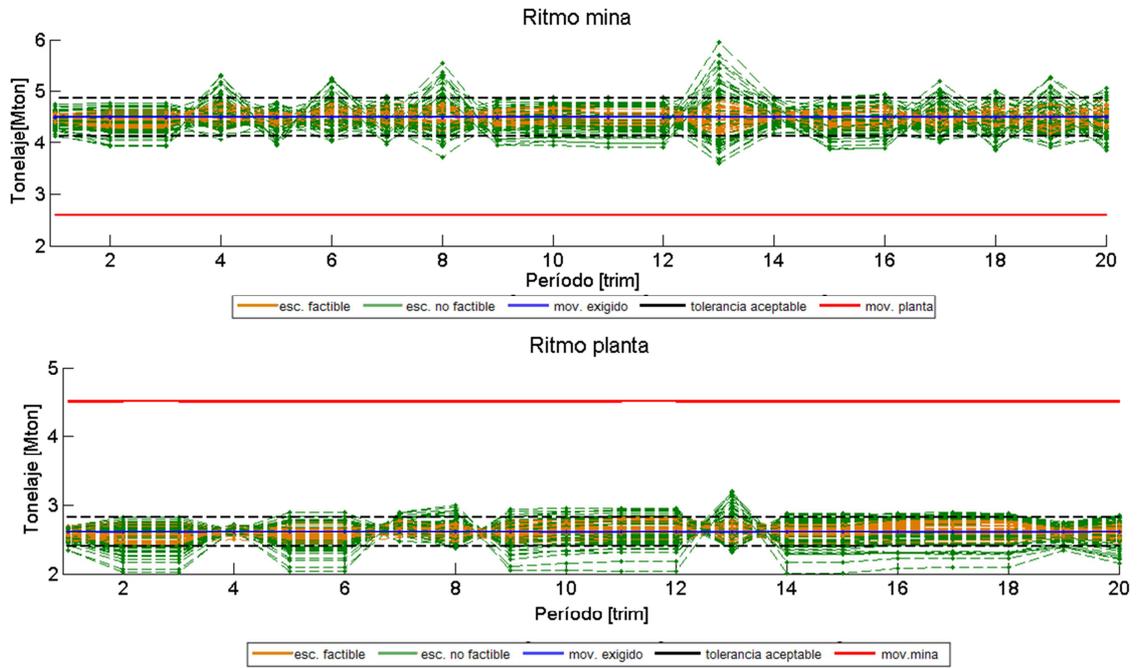


Figura 26: Ritmos de producción, secuencia 8

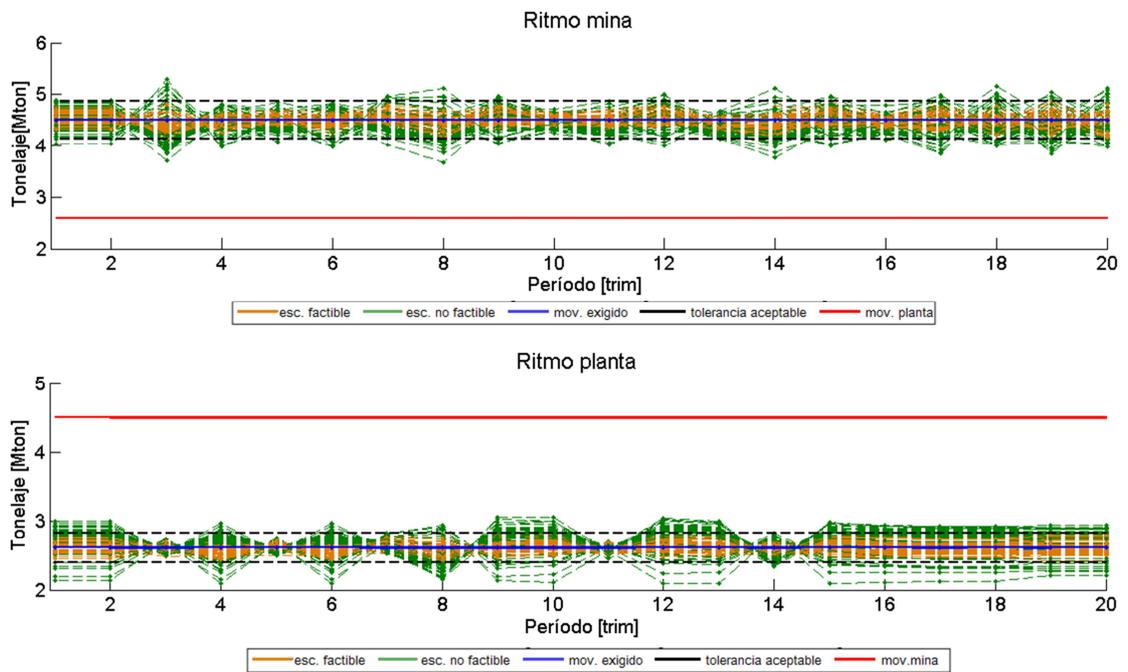
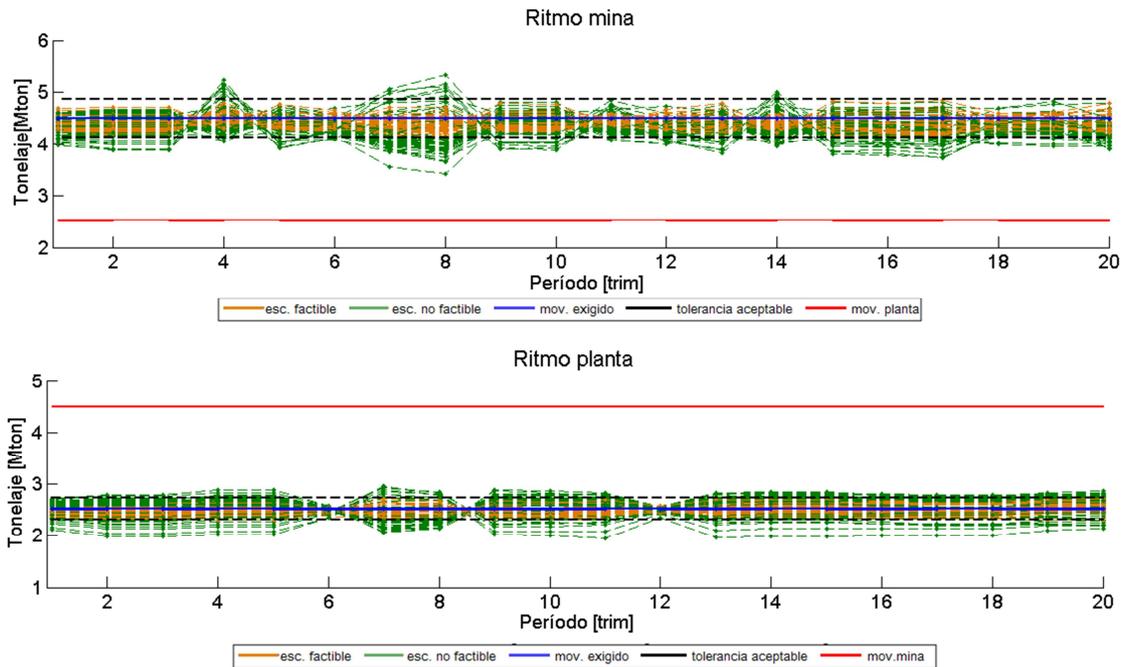


Figura 27: Ritmos de producción, secuencia 30



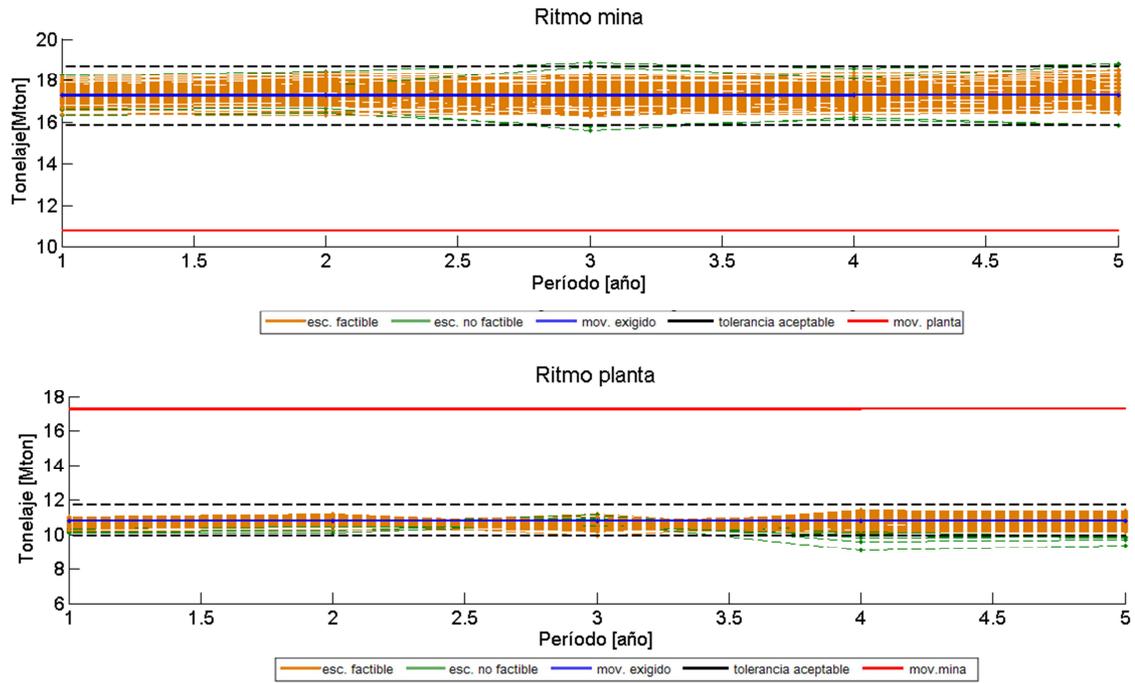
**Figura 28: Ritmos de producción, secuencia 96**

Las dos primeras secuencias corresponden a aquellas que presentan las mejores evaluaciones económicas, mientras que el tercer caso con mejor índice de factibilidad posee la peor evaluación económica dentro de los escenarios selectos.

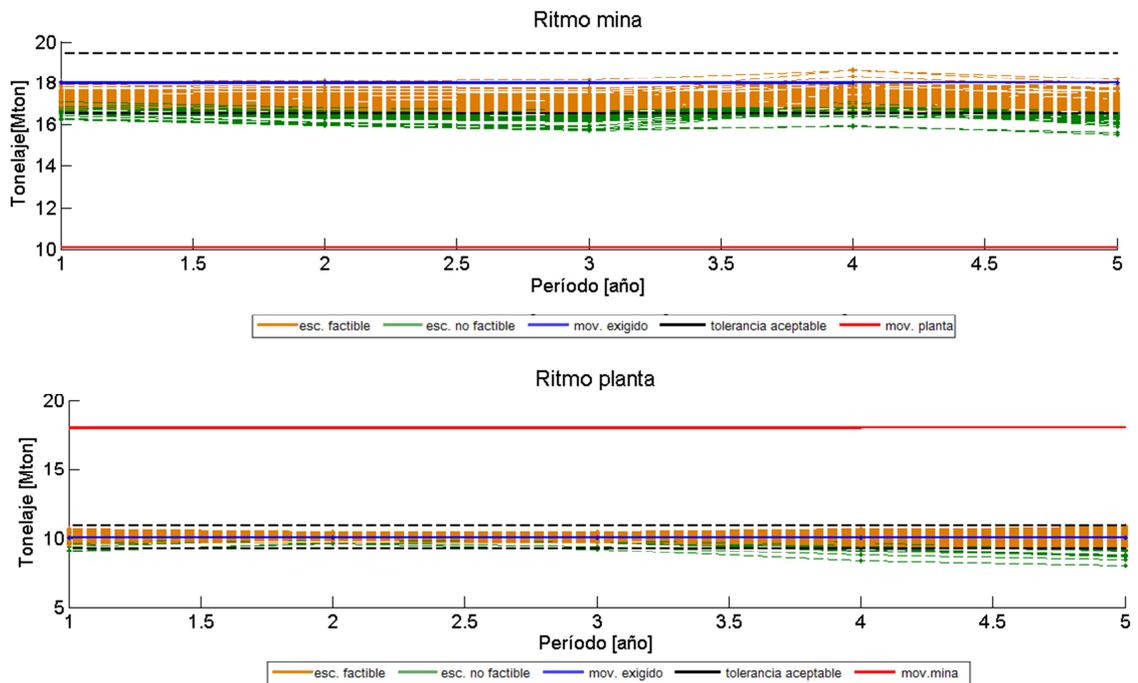
Los ritmos de los restantes escenarios selectos se presentan en el apéndice C1.

#### **5.4.2 Producción constante anual**

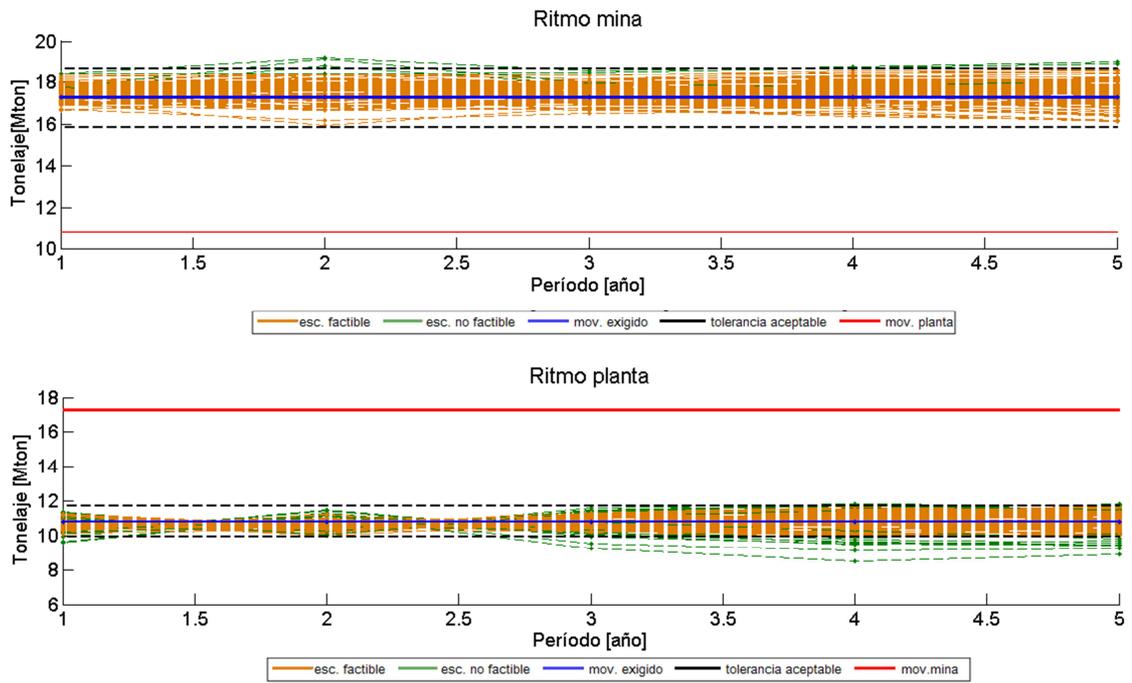
A continuación se presentan los ritmos de las 4 secuencias que presentan mayor índice de factibilidad.



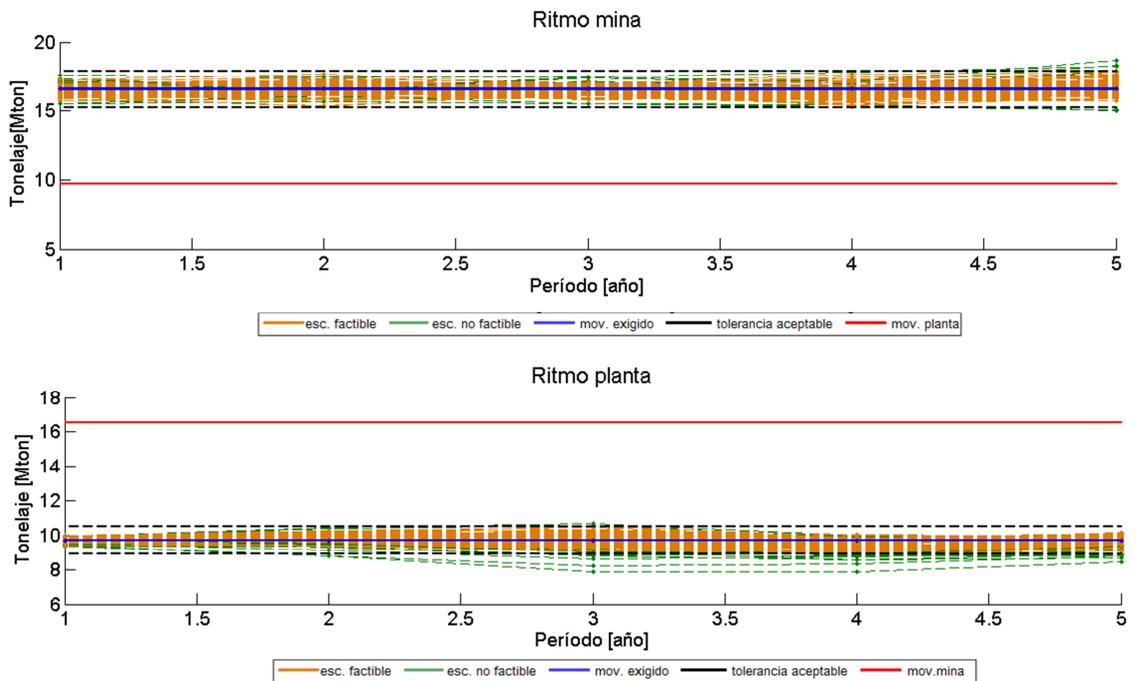
**Figura 29: Ritmos de producción, secuencia 94**



**Figura 30: Ritmos de producción, secuencia 98**



**Figura 31: Ritmos de producción, secuencia 26**



**Figura 32: Ritmos de producción, secuencia 92**

A excepción de la secuencia 8, los ritmos que se exponen corresponden a los planes que presentan las peores evaluaciones económicas según la Tabla 7.

Los ritmos de los restantes escenarios selectos se presentan en el apéndice C2.

## 6 Capítulo: Análisis de resultados

### 6.1 Respecto a la incorporación de incertidumbre

Con motivo de evaluar la influencia de la incertidumbre en la selección de plan, se considera el empleo del índice de factibilidad y del criterio I para evaluar y comparar 2 situaciones respecto al caso base que se ha abordado en el estudio. De este modo, se tiene lo siguiente:

- Caso Base: Escenario con incertidumbre geológica y de precios
- Caso C<sub>1</sub>: Escenario con incertidumbre geológica. Los precios a emplear corresponden a los expuestos en la Tabla 2.
- Caso C<sub>2</sub>: Escenario con incertidumbre de precio. En términos de leyes, se utilizan aquellas que se obtienen de implementar kriging.

A continuación, se presentan los índices de factibilidad que se obtienen de aplicar los planes a los casos.

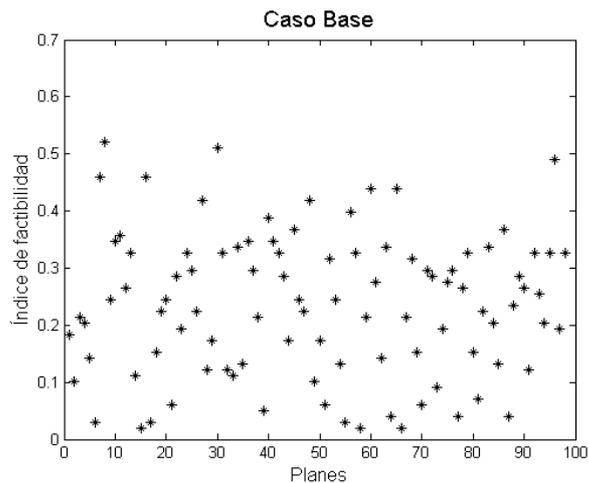


Figura 33: índice de factibilidad de caso base

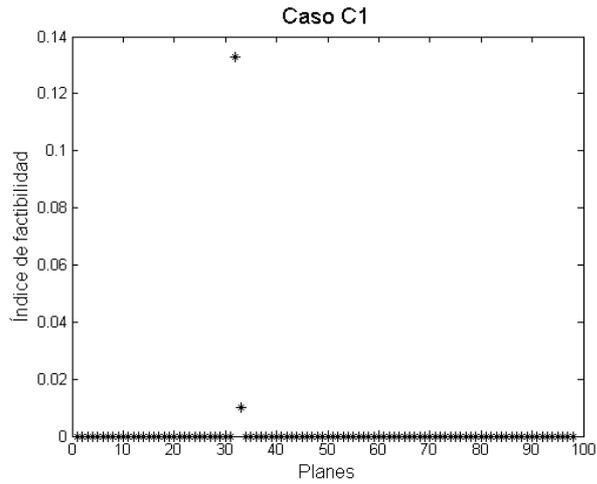


Figura 34: índice de factibilidad de caso C<sub>1</sub>

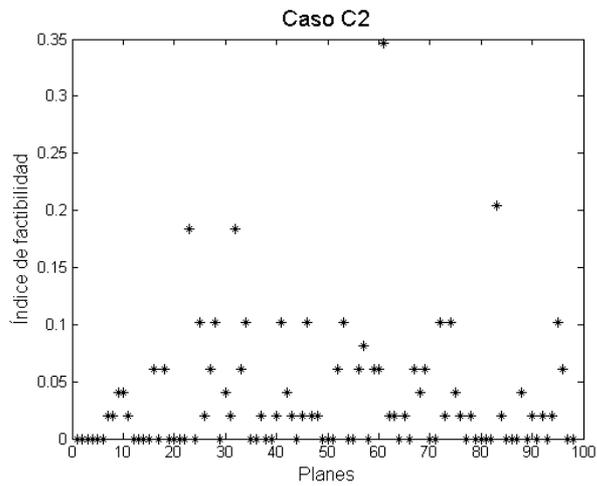


Figura 35: índice de factibilidad de caso C<sub>2</sub>

Lo primero que destaca al comparar los gráficos es el bajo índice de factibilidad que en promedio se alcanzan sin perjuicio del caso base. Es natural que los mejores índices de factibilidad se asocien al caso base en vista de que las secuencias se construyeron a partir de alguno de los escenarios que la componen. El hecho de considerar sólo un tipo de incertidumbre incurre en 2 diferenciaciones: entre escenarios y entre casos, hecho que gatilla incluso la no factibilidad de desarrollo de ciertos planes. La última situación se evidencia de manera más pronunciada en el caso C<sub>1</sub>, donde se considera únicamente la incertidumbre geológica y un precio que varía anualmente en lugar de trimestralmente. Se presume que el cambio en el horizonte temporal de dichas variaciones es el principal causante del comportamiento.

Para referirse al impacto en términos económicos, a continuación se presentan los histogramas de VPN que se asocian a la selección de los planes con mayor índice de factibilidad para cada caso.

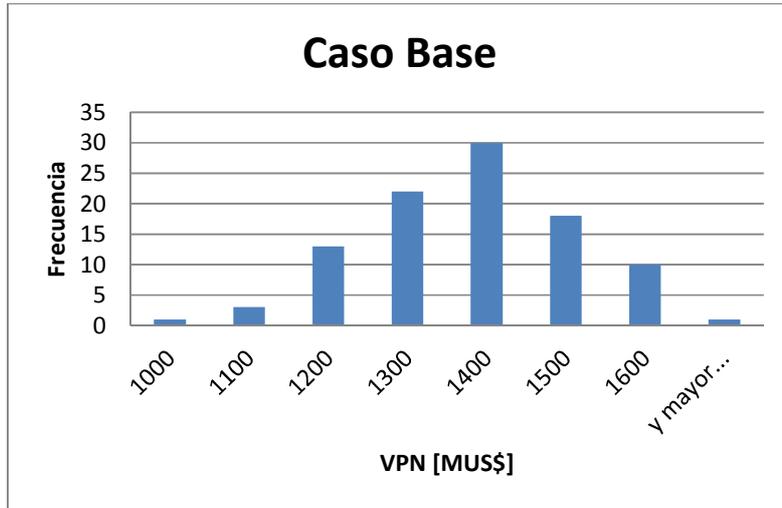


Figura 36: Histograma de caso base

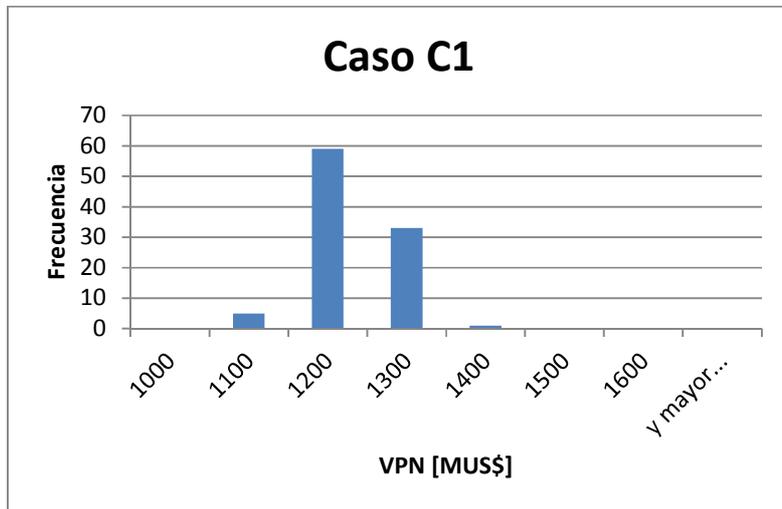


Figura 37: Histograma de caso  $C_1$

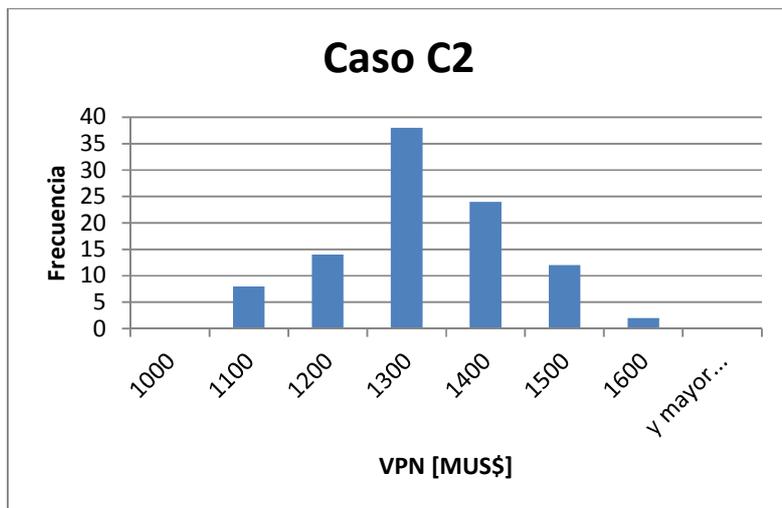


Figura 38: Histograma de caso  $C_2$

Las estadísticas básicas de los planes se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8: Estadística básica del VPN de los planes con diferentes fuentes de incertidumbre**

Caso	Máximo VPN [MUS\$]	Mínimo VPN [MUS\$]	VPN promedio [MUS\$]
Base	1.618	990	1.325
C <sub>1</sub>	1.335	1.061	1.180
C <sub>2</sub>	1.540	1.068	1.275

Como bien se menciona previamente, los planes derivan de una optimización a los escenarios del caso base y, por tanto, en promedio se espera que los mejores VPN se ligen a dicho caso.

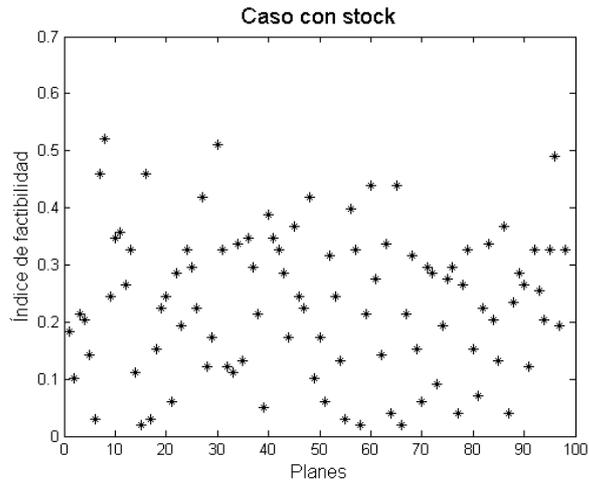
Se reconoce que el caso C<sub>1</sub> reporta una menor variabilidad en el VPN respecto al caso base. La explicación que fundamenta el comportamiento se liga al proceso de definición de actividades a ser secuenciadas en UDESS y a la ausencia de incertidumbre en el precio. A modo de aclaración, en 3.2 se plantea el uso de las leyes L1 y L2 para la definición de tonelajes a ser enviados a un destino fijo o incierto. Si no se considera incertidumbre en el precio, todos los escenarios a considerar poseen el mismo L1 y L2 como limitantes del tonelaje con destino indefinido. Este hecho permite suponer, en consideración tanto de subestimaciones y sobreestimaciones de las leyes respecto a otro escenario en estudio, que los tonelajes totales a secuenciar no difieren de manera considerable para influir significativamente en la valorización del proyecto y, por lo tanto, la variabilidad en los resultados finales es menor.

De manera consecuente a las premisas anteriores, el histograma del caso C<sub>2</sub> se asemeja al caso base, pero desplazado a valores menores. Cabe señalar que la variabilidad es mayor en el caso base, producto de que éste contempla además los aportes ligados al empleo de incertidumbre geológica.

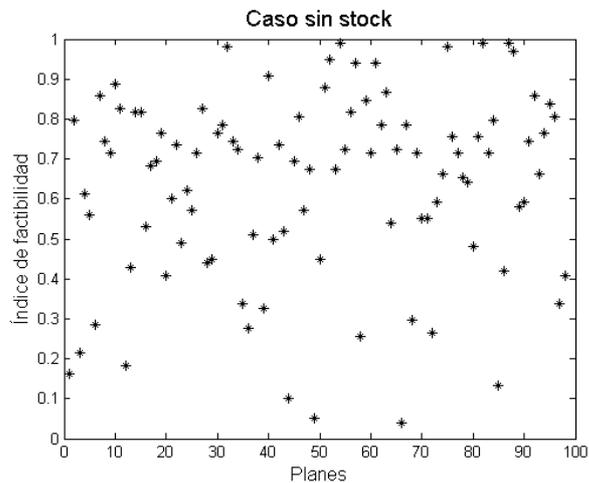
## **6.2 Respecto al uso de stocks**

A diferencia del análisis anterior, para la evaluación del efecto en el uso de stocks se procede a la construcción de planes en los cuales no se considera el uso de stocks de acopio. Pese a ello, el proceder es similar a la sección anterior: La presentación del índice de factibilidad para el caso con y sin stocks, la selección del plan con mayor índice para efectos de comparación y el análisis de resultados respectivo.

La Figura 39 y la Figura 40 muestran los índices de factibilidad de los planes.



**Figura 39: índice de factibilidad de caso con stocks**



**Figura 40: índice de factibilidad de caso sin stocks**

Se evidencian claramente mejores índices de factibilidad en el caso sin uso de stocks. Se presume que el empleo de únicamente L1<sup>5</sup> en el proceder de clasificación de material como estéril o mineral (ver en 3.2) no diferencia de manera drástica las porciones de mineral y estéril entre los distintos escenarios. Por otro lado, el uso de L2 en el proceder deriva en diferenciaciones más significativas en los tonelajes de mineral y mineral marginal en los diversos escenarios, provocando así mayores dificultades en el alcance de los ritmos exigidos por un plan y menores índices de factibilidad.

Gráficamente, a continuación se exponen los ritmos de producción asociados a los escenarios selectos por mayor índice de factibilidad, en la Figura 41 y la Figura 42.

---

<sup>5</sup> El caso sin stocks no contempla uso de L2 ni de actividades sin destino fijo. Aquella porción de material se clasifica como mineral.

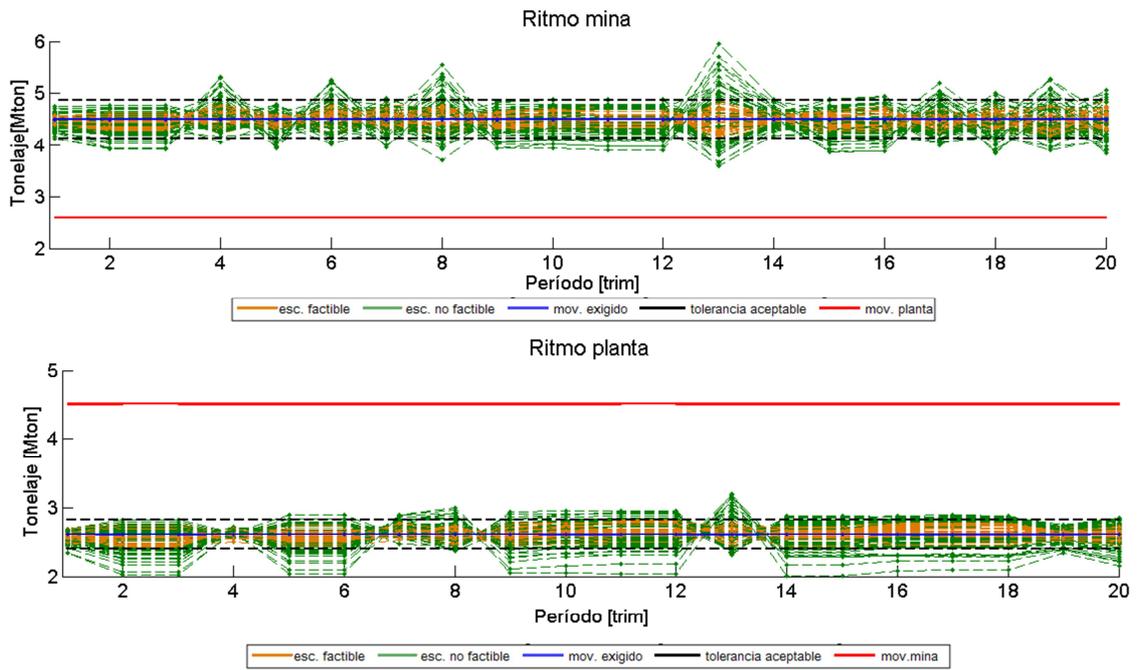


Figura 41: Ritmos de producción con stock

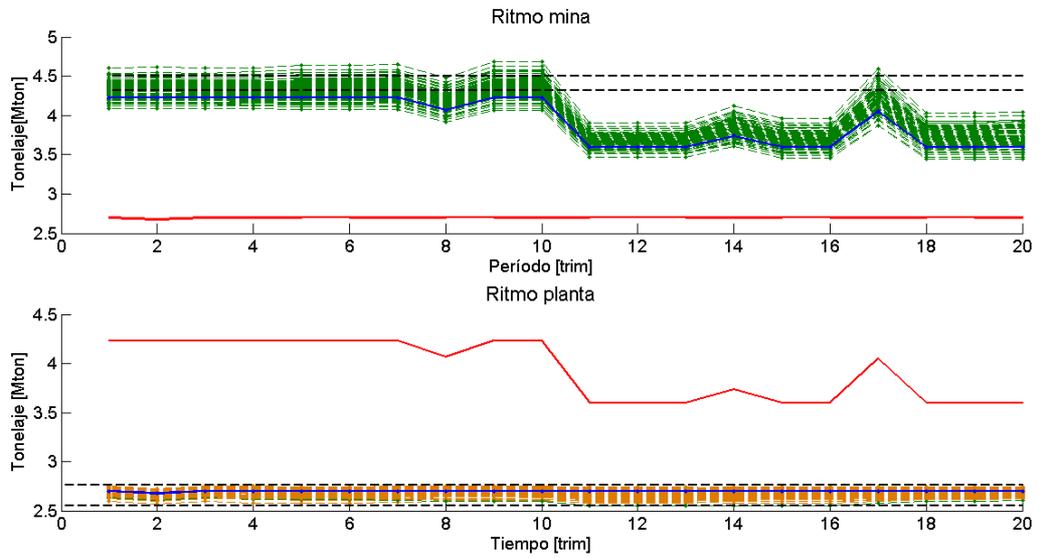


Figura 42: Ritmos de producción sin stock

Vale la pena mencionar que si bien era factible la constancia del movimiento mina en los escenarios con uso de stocks, las condiciones del caso de estudio no favorecen esta restricción para el caso sin stocks y por lo tanto no se considera.

Respecto a las evaluaciones económicas, se muestran los histogramas respectivos.

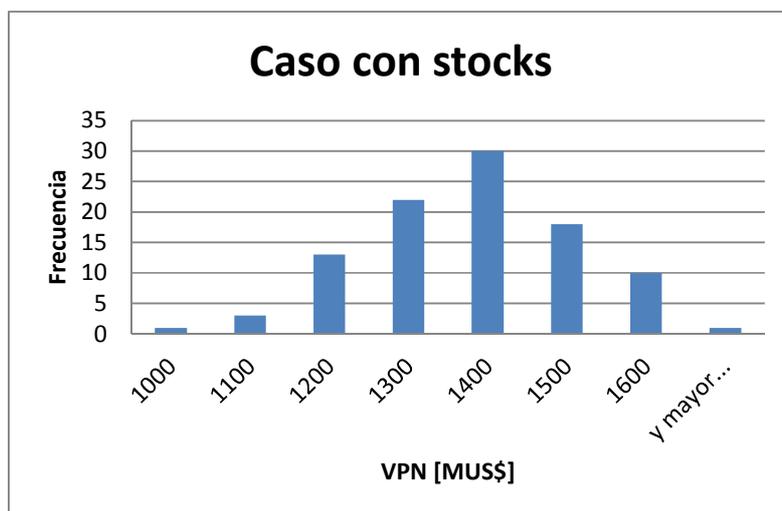


Figura 43: Histograma de caso con stocks

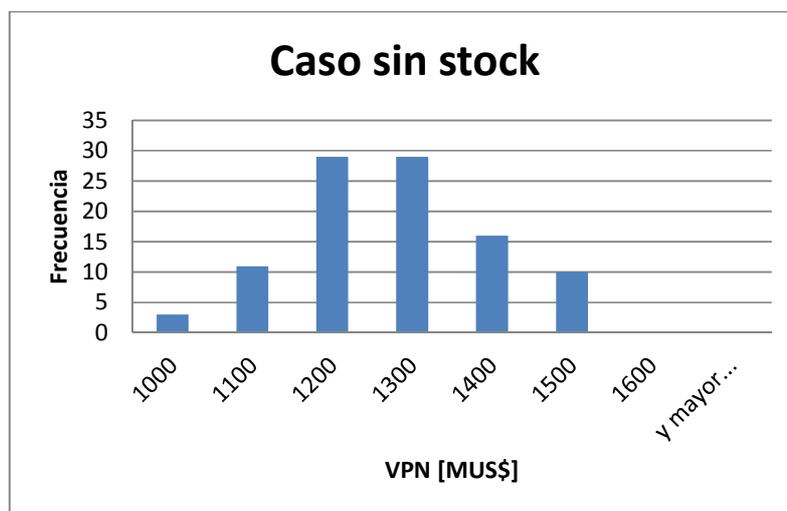


Figura 44: Histograma sin stocks

Las estadísticas básicas de los planes se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Estadística básica del VPN de los planes con uso y desuso de stocks

Caso	Máximo VPN [MUS\$]	Mínimo VPN [MUS\$]	VPN promedio [MUS\$]
Con stock	1.618	990	1.325
Sin stock	1.483	947	1.226

La curva del histograma sin stock indica cierto desplazamiento hacia valores más bajos de VPN y una reducción en la variabilidad de sus valores.

En efecto, la información expuesta en la Tabla 9 indica que el VPN promedio del plan sin stocks es 99 [MUS\$] menor que aquel asociado al plan con stocks y la diferencia entre los valores límites (máximo y mínimo) también es menor. En el caso con stocks, se presume que el aumento del VPN se debe al hecho del procesamiento de las mejores leyes en tiempos tempranos y el aumento de la variabilidad a los aportes ligados al uso de dos leyes de corte, en lugar de una.

## **7 Capítulo: Conclusiones y trabajo futuro**

### **7.1 Conclusiones**

La planificación minera, en su metodología usual, emplea parámetros que se asumen conocidos con certeza. Lamentablemente, dichos parámetros poseen incerteza en sus predicciones y se corre el riesgo de que los planes de producción resultantes tengan exigencias que no se pueden cumplir en la implementación. La metodología descrita propone una visión de las incertidumbres como una oportunidad de mejoramiento del proceso en lugar de un riesgo latente, a partir de la planificación de variados escenarios representativos de la incertidumbre y el uso de stocks como elemento de control de los ritmos y de mejoramiento del valor económico. Otro elemento de control del riesgo que se emplea es la etapa titulada calibración del ritmo de producción referencial. Así, se obtienen múltiples planes de producción, a ser evaluados para efectos de selección de aquellos que sean más atractivos de ejecutar y, finalmente, de presentación para guiar la elección final de un único plan.

Como consideraciones relevantes en la implementación, se rescata la importancia de evaluar previamente las principales fuentes de incertidumbre asociadas al proyecto y sus metodologías de estimación. Con ello, se busca incorporar al proceder sólo los elementos claves en el correcto funcionamiento del plan y efectuar estimaciones que se ajusten de manera adecuada al problema en estudio.

Otra observación no menor dice relación con el uso de criterios de selección y presentación de planes que sean representativos de los objetivos estratégicos del proyecto en cuestión. Existen variadas alternativas de ejecución de ambas etapas en la metodología y no existe un plan óptimo en todos los aspectos posibles de evaluación. Al no ser única la mejor respuesta a la problemática, adquieren mayor relevancia estos puntos en el sentido de buscar el desarrollo del mejor plan según los estándares de la empresa que lo implementa.

A partir de la implementación en un caso de estudio, se evalúa el impacto de la incorporación de incertidumbre y del uso de los stocks. En lo que respecta al empleo de stocks, cuyo uso es de carácter opcional, se desprende que estos favorecen el procesamiento de las mejores leyes en tiempos tempranos, mejorando el VPN (En el caso de estudio, en promedio mejora en 8[%] su valor respecto al plan sin stocks). Por otro lado, no se tiene una tendencia clara en el mejor control de los ritmos de producción (El caso de estudio muestra mayor variabilidad del ritmo mina en el caso sin stocks, pero también menor variabilidad en el ritmo planta). Se presume que los stocks se podrían usar en favor de la reducción de las variaciones en el ritmo de la planta, a partir de desviaciones del plan en la cantidad de material que sale del acopio

Respecto a la incorporación de incertidumbre, la consideración de todas las fuentes que generan incerteza origina el plan con mejor evaluación económica y mayor variabilidad (en promedio mejora en 4 y 12[%] respecto al plan evaluado sólo con incertidumbre geológica y sólo con

incertidumbre de precios, respectivamente). Este hecho refuerza la sugerencia expuesta en el segundo párrafo.

Además, de la implementación se desprende el potencial del uso del ritmo de producción referencial. Su empleo fortalece la capacidad de un plan de ajustarse a un escenario distinto del que le dio origen y, en términos gráficos, no se reconoce una gran variabilidad del ritmo de producción en los planes selectos al considerar todos los planes representativos de la incertidumbre presente en el proyecto.

Finalmente, si bien la metodología presenta variadas fortalezas (planes acotados a un ritmo de producción referencial, uso de stocks para el control de riesgos, sencilla interpretación de resultados, entre otros), también presenta debilidades. La principal de ellas se refiere a la ausencia de etapas y restricciones que permiten hacer práctica su implementación, tales como el diseño del rajo o la capacidad de almacenamiento de los stocks de acopio. También se reconoce que el proceder en las etapas de calibración y construcción de planes es laborioso y algo complejo. Sin embargo, son debilidades con opción a ser eliminadas.

## **7.2 Trabajos futuros**

Como posibles trabajos a futuro que se desprenden del trabajo en cuestión se tienen:

1. *Incorporar elementos del diseño minero en la metodología:* Contemplar elementos de diseño en el proceder previo al secuenciamiento (rampas, fases, etc.), para efectos prácticos de la metodología y mayor precisión en el tamaño de los bancos a extraer.
2. *Incorporar flexibilidades en el proceso de planificación:* Existen otras metodologías de evaluación económica, las cuales contemplan acciones que se pueden implementar y que generan cambios en el plan, tales como: cierre temporal de la mina, expansiones, entre otros.
3. *Extender los alcances respecto al uso de botaderos y stocks.* Contemplar el tema de su ubicación física y sus limitaciones en capacidad.
4. *Automatizar la ejecución de protocolos:* Los protocolos expuestos tienen potencial para ser automatizados y así simplificar el proceder de la metodología y reducir los tiempos de resolución de la optimización.

## Bibliografía

- [1] Abdel Sabour, S. & Dimitrakopoulos, R., 2011. *Incorporating Geological and Market Uncertainties and Operational Flexibility into Open Pit Mine Design*, s.l.: Journal of Mining Science Vol 47 (2) pp. 191-201.
- [2] Asad, M., 2005. *Cutoff Grade Optimization Algorithm with Stockpiling Option for Open Pit Mining Operations of Two Economic Minerals*, s.l.: International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment Vol 19 (3) pp. 176-187.
- [3] Azimi, Y., Osanloo, M. & Esfahanipou, A., 2013. *An Uncertainty Based Multi-Criteria Ranking System for Open Pit Mining Cut-Off Grade Strategy Selection*, s.l.: Resources Policy Vol 38 pp.212-223.
- [4] Black, F., Jensen, M. & Scholes, M., 1972. *The Capital Asset Pricing Model: Some Empirical Tests*, s.l.: Studies in the Theory of Capital Markets, Praeger Publishers Inc, pp. 79-121.
- [5] CODELCO, G. d. c., 2014. Codelco Coloca Bonos por 600 Millones de Euros a 10 años en el Mercado Internacional. *prensa CODELCO*, 2014 Julio.
- [6] Contreras, E., 2011. *Indicadores*, s.l.: Apunte de curso: Análisis y Matemáticas Financieras, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- [7] Cox, J., Ross, S. & Rubinstein, M., 1978. *Option Pricing: A Simplified Approach*, s.l.: Research Program in Finance, Working Paper 79.
- [8] Damodaran, A., 2014. *Damodaran Online: Home Page for Aswath Damodaran*. [En línea] Available at: [http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/ctryprem.html](http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html) [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [9] Darden, s.f. *Binomial Option Pricing*, s.l.: Darden Graduate School of Business Administration, University of Virginia.
- [10] Dehghani, H. & Atae-pour, M., 2012. *Determination of the Effect of Operating Cost Uncertainty on Mining Project Evaluation*, s.l.: Resources policy Vol 37 (1) pp. 109-117.
- [11] Emery, X., 2011. *Geoestadística*, s.l.: Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [12] Emery, X., 2013. *Incertidumbre Global*, s.l.: Apunte de curso: Simulación Geoestadística, Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.
- [13] Emery, X., 2013. *Simulación Multigaussina*, s.l.: Apunte de curso: Simulación Geoestadística, Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.

- [14] Enciclopedia Financiera, s.f. *Formula WACC*. [En línea] Available at: <http://www.encyclopediainanciera.com/analisisfundamental/valoraciondeactivos/formula-wacc.htm> [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [15] Farlex Financial, D., 2012. *The Free Dictionary by Farlex*. [En línea] Available at: <http://financial-dictionary.thefreedictionary.com/Price+Uncertainty> [Último acceso: 9 Mayo 2015].
- [16] Giddy, I., 2008. *Giddy's Web Resources in Finance*. [En línea] Available at: [www.stern.nyu.edu/~igiddy/spreadsheets/WACC\\_tutorial.xls](http://www.stern.nyu.edu/~igiddy/spreadsheets/WACC_tutorial.xls) [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [17] Knoema, 2014. *Knoema*. [En línea] Available at: [http://knoema.com/wxgcxde/commodity-prices-forecast-2013-2018-charts-and-tables#Copper%20\(US%20cents%20Flb\)](http://knoema.com/wxgcxde/commodity-prices-forecast-2013-2018-charts-and-tables#Copper%20(US%20cents%20Flb)) [Último acceso: 18 Agosto 2014].
- [18] KPMG, 2014. *Corporate Tax Rates Tables*. [En línea] Available at: <http://www.kpmg.com/global/en/services/tax/tax-tools-and-resources/pages/corporate-tax-rates-table.aspx> [Último acceso: 15 Octubre 2014].
- [19] Lay, R., 2012. Análisis de Riesgos en la Planificación Minera. *Minería chilena*, Volumen Mayo, pp. 131-135.
- [20] Lerch, H. & Grossmann, I., 1965. *Optimum Design of Open-Pit Mines*, s.l.: CIM, Vol 58 pp. 17-24.
- [21] Letelier, I., 2012. *Impacto de la Incertidumbre del Modelo Geológico en un Proyecto Minero*, s.l.: Memoria de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile.
- [22] Mascareñas, J., 2013. *Procesos Estocásticos: El Proceso de Wiener*, s.l.: Monografías de Juan Mascareñas sobre Finanzas Corporativas, ISSN: 1988-1878, Universidad Complutense de Madrid.
- [23] Mayer, Z. & Kazakidis, V., 2007. *Decision Making in Flexible Mine Production System Design using Real Options*, s.l.: Journal of Construction Engineering and Management Vol 133 (2) pp. 169-180.
- [24] Ministerio de Hacienda, 2010. *Características Financieras - Ministerio de Hacienda*. [En línea] Available at: <http://www.hacienda.cl/oficina-de-la-deuda-publica/bonos-de-tesoreria/bonos->

[soberanos/caracteristicas-financieras.html](#)

[Último acceso: 15 Octubre 2014].

[25] Newman, A. y otros, 2010. *A Review of Operations Research in Mine Planning*, s.l.: Interfaces Vol 40 (3) pp. 222-245.

[26] Rocher, W., 2012. *Secuenciamiento Óptimo de Preparación Minera Subterránea*, s.l.: Tesis de Magíster en Minería, Memoria de Ingeniería Civil e Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile.

[27] Rubio, E., 2006. *Block Cave Mine Infrastructure Reliability Applied to Production Planning*, s.l.: Thesis of Doctor in Philosophy in Mining Engineering, University of British Columbia, Canada.

[28] Rubio, E., 2007. *Horizontes de Planificación*, s.l.: Apunte de curso: Tópicos Avanzados en Planificación Minera, Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.

[29] Rubio, E., 2009. *Planificación Minera a Cielo Abierto*, s.l.: Apunte de curso: Tópicos Avanzados en Planificación Minera, Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.

[30] Schwartz, E., 1997. *The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging*, s.l.: The Journal of Finance Vol 52 (3) pp. 923-973.

[31] Schwartz, E., 1997. *The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging*, s.l.: Journal of finance Vol 52 (3) pp. 923-973.

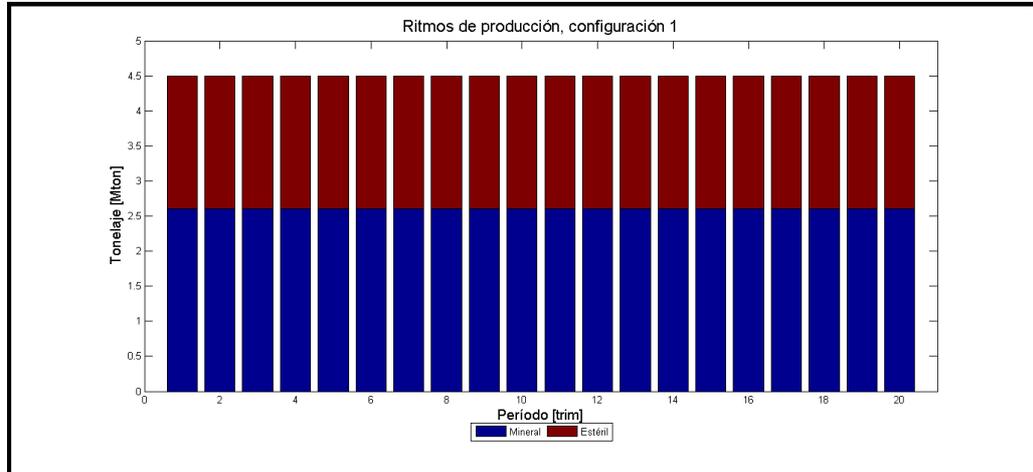
[32] Tulcaza, E., 1999. *Evaluación de Recursos y Negocios Mineros: Incertidumbres, Riesgos y Modelos Numéricos*, Santiago, Chile: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

[33] Vargas, M., 2011. *Modelo de Planificación Minera de Corto y Mediano Plazo Incorporando Restricciones Operacionales y de Mezcla*, s.l.: Tesis de Magíster en Minería, Memoria de Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile.

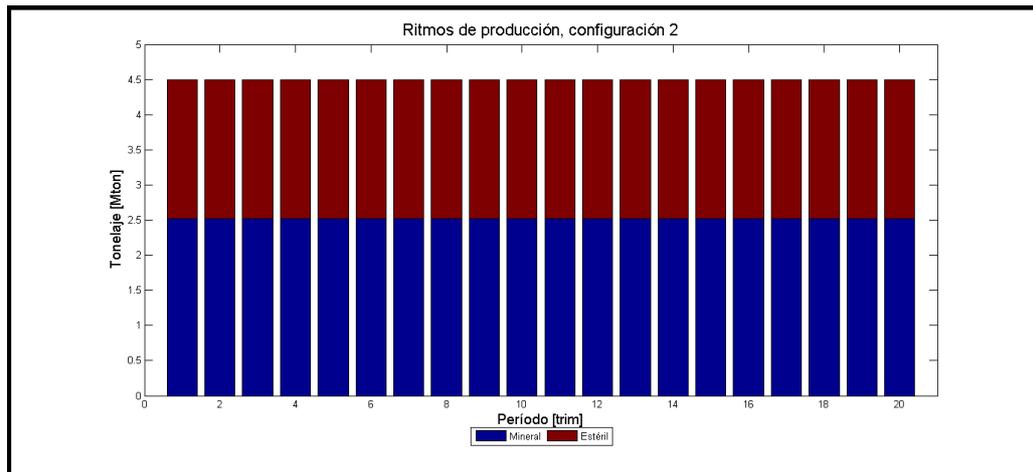
[34] Whittle, J., 1998. *Four-X User Manual*, Melbourne, Australia: Whittle Programming.

## Anexos

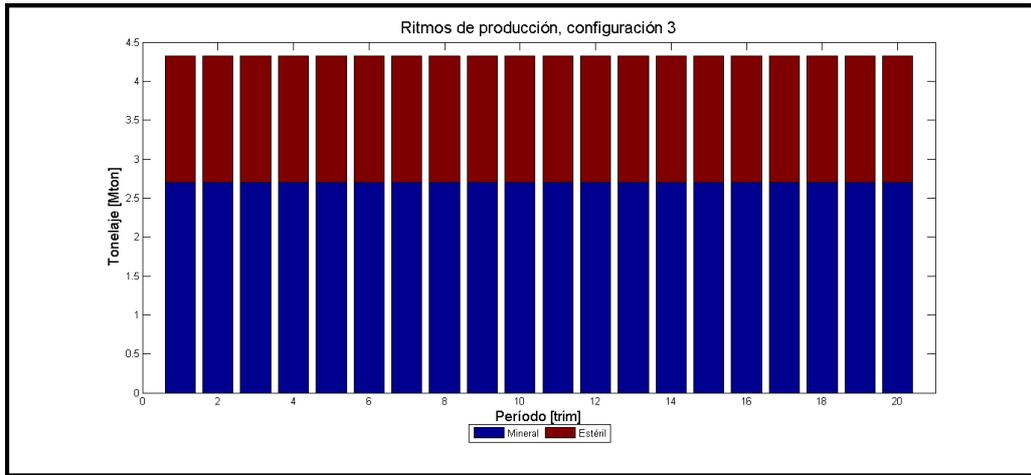
### Anexo A: Ritmos de producción asociados a las configuraciones de UDESS



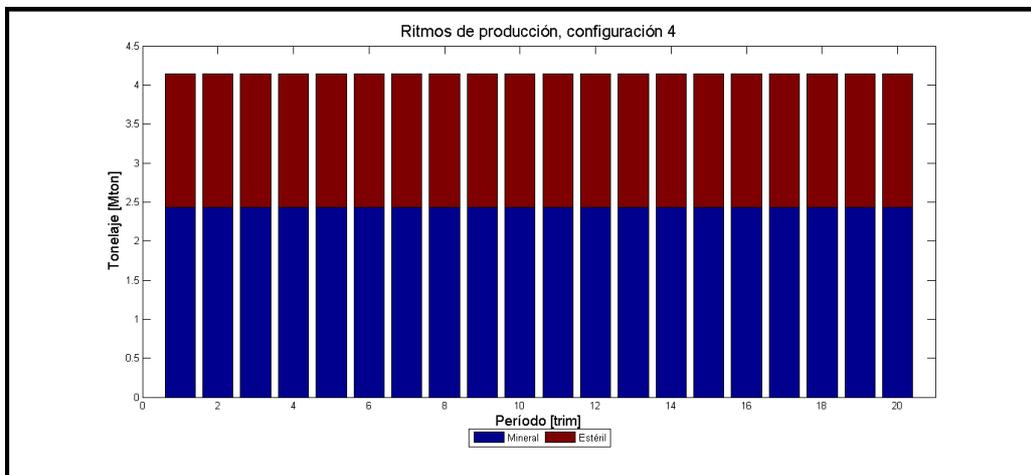
Apéndice 1: Ritmos de producción, configuración 1



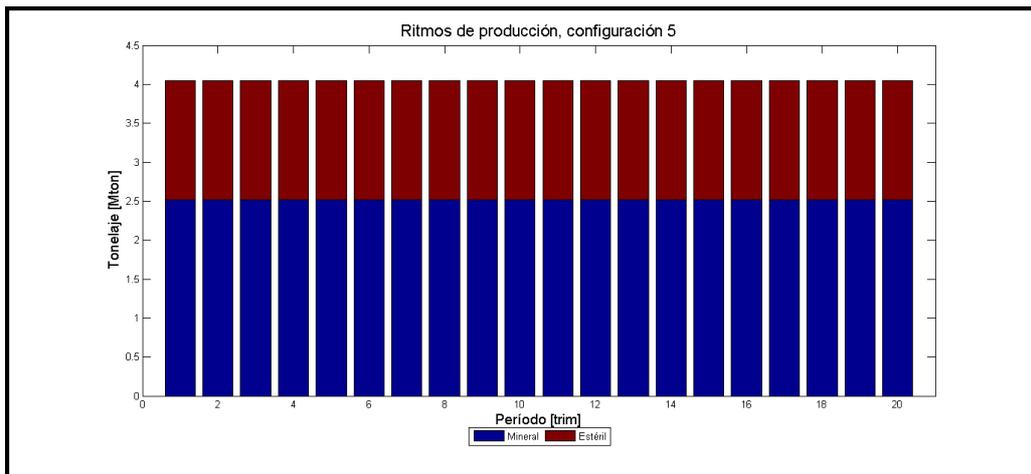
Apéndice 2: Ritmos de producción, configuración 2



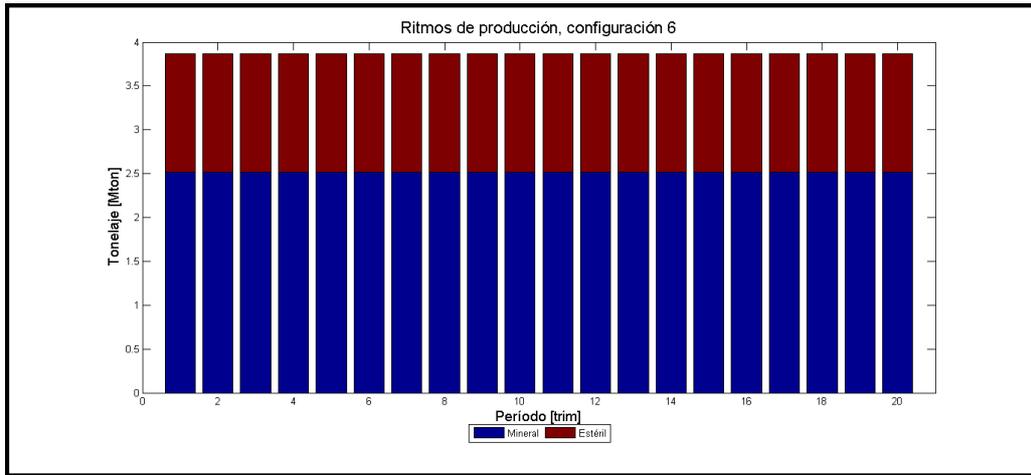
Apéndice 3: Ritmos de producción, configuración 3



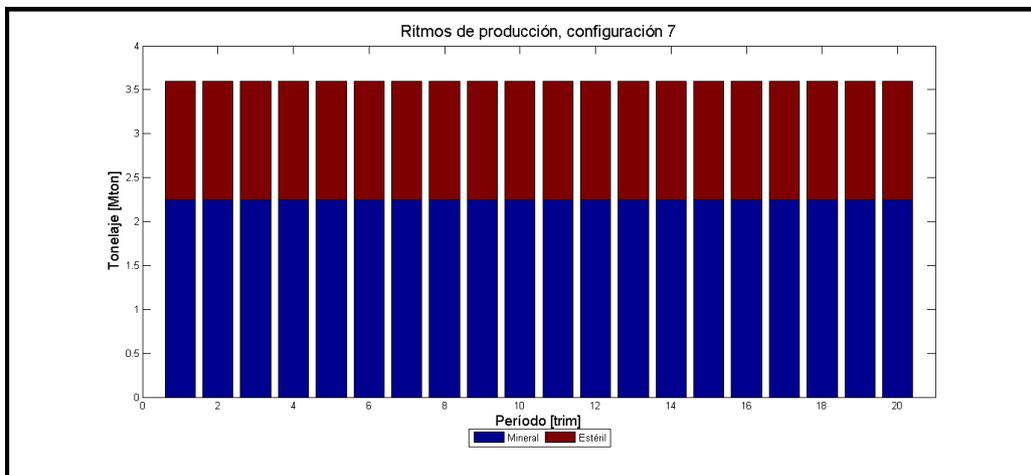
Apéndice 4: Ritmos de producción, configuración 4



Apéndice 5: Ritmos de producción, configuración 5



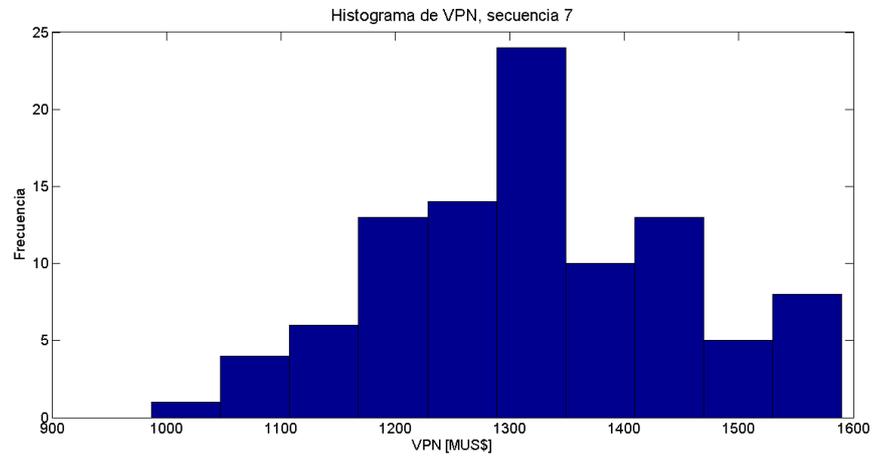
Apéndice 6: Ritmos de producción, configuración 6



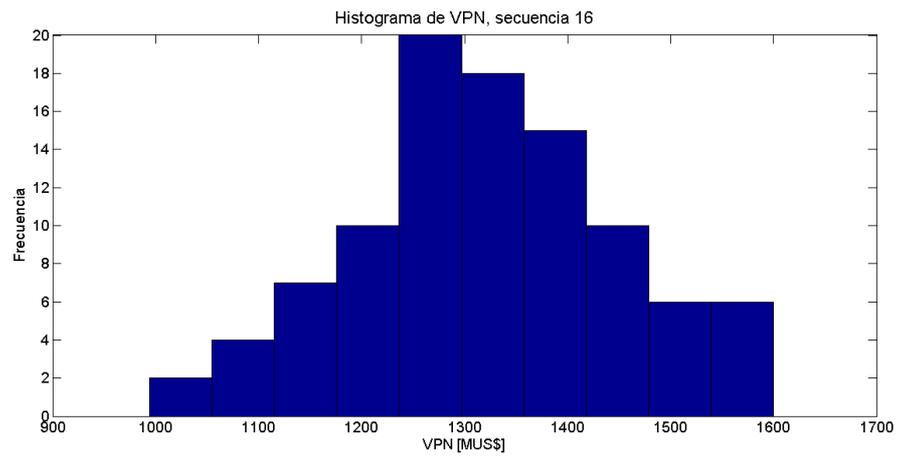
Apéndice 7: Ritmos de producción, configuración 7

## Anexo B: Histograma de VPN de planes selectos

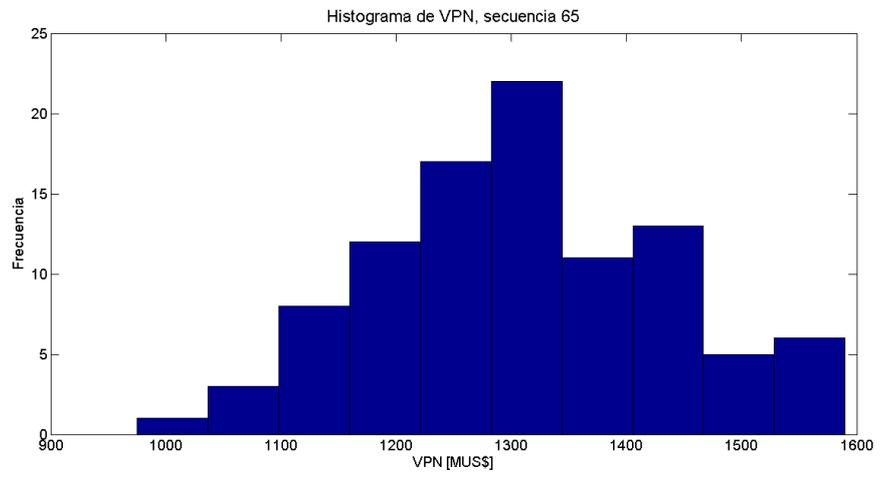
### B1: Criterio de selección I



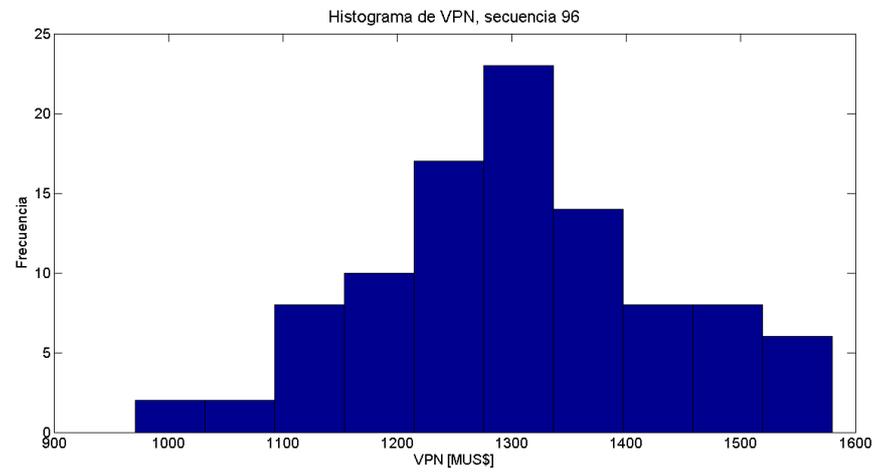
Apéndice 8: Histograma de VPN, secuencia 7



Apéndice 9: Histograma de VPN, secuencia 16

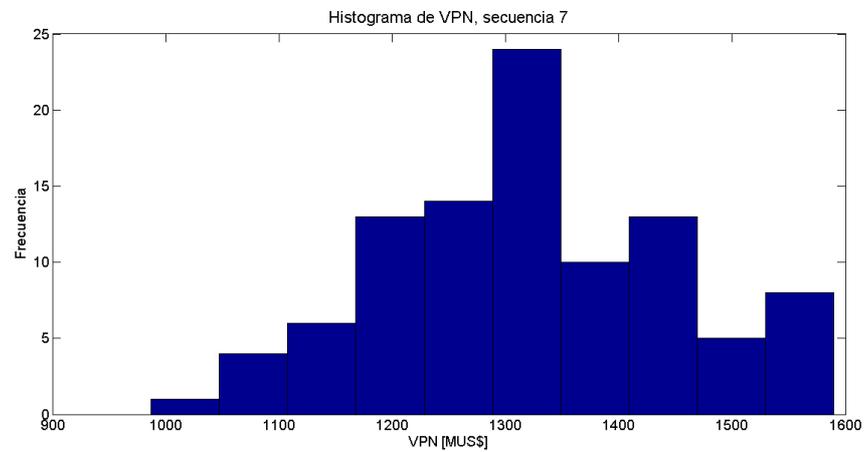


**Apéndice 10: Histograma de VPN, secuencia 65**

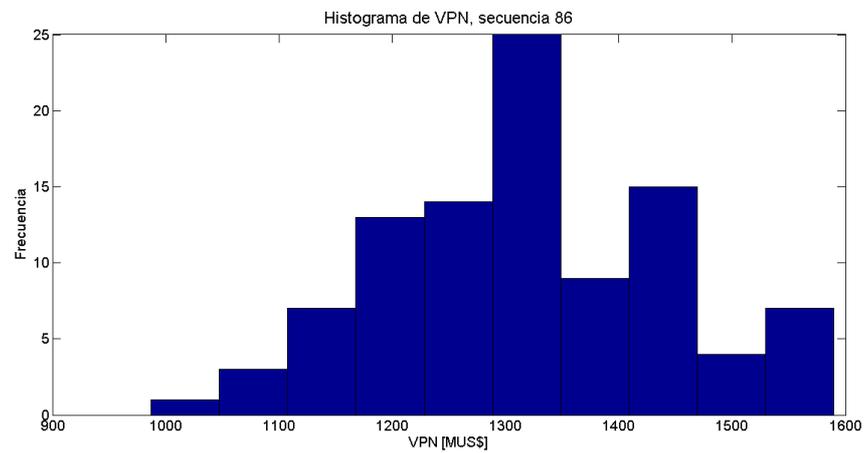


**Apéndice 11: Histograma de VPN, secuencia 96**

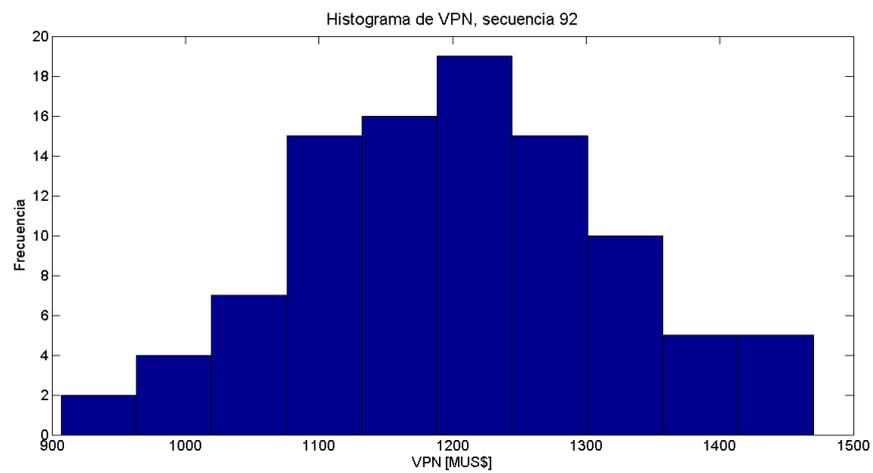
## B2: Criterio de selección II



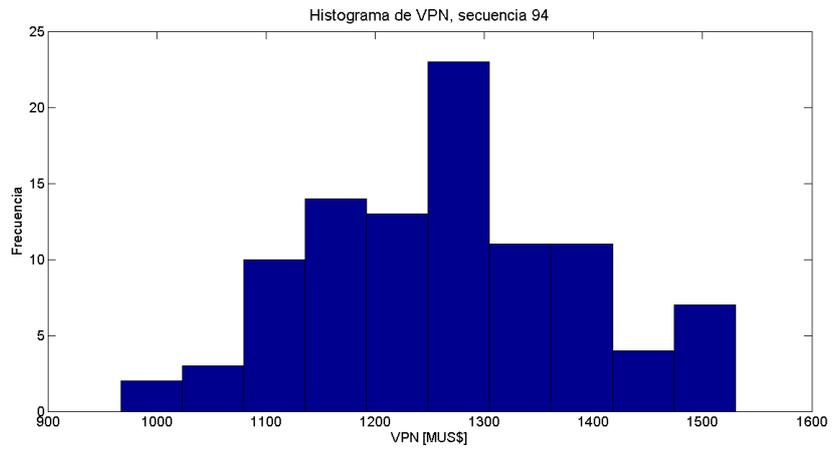
Apéndice 12: Histograma de VPN, secuencia 7



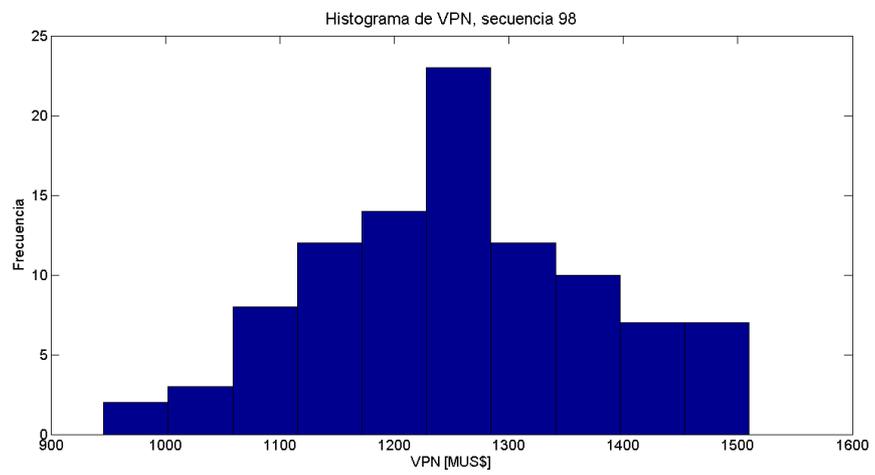
Apéndice 13: Histograma de VPN, secuencia 86



Apéndice 14: Histograma de VPN, secuencia 92



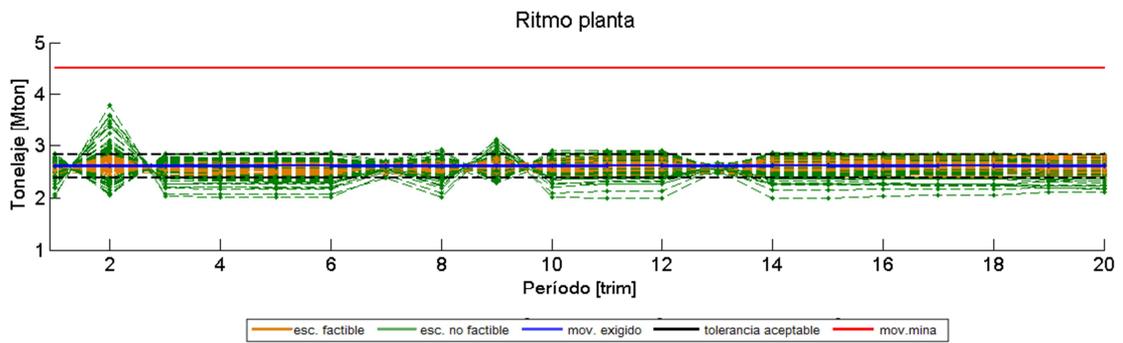
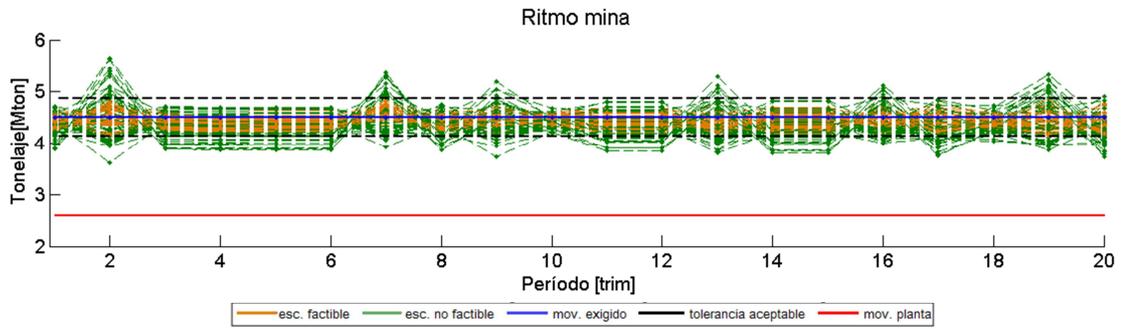
**Apéndice 15: Histograma de VPN, secuencia 94**



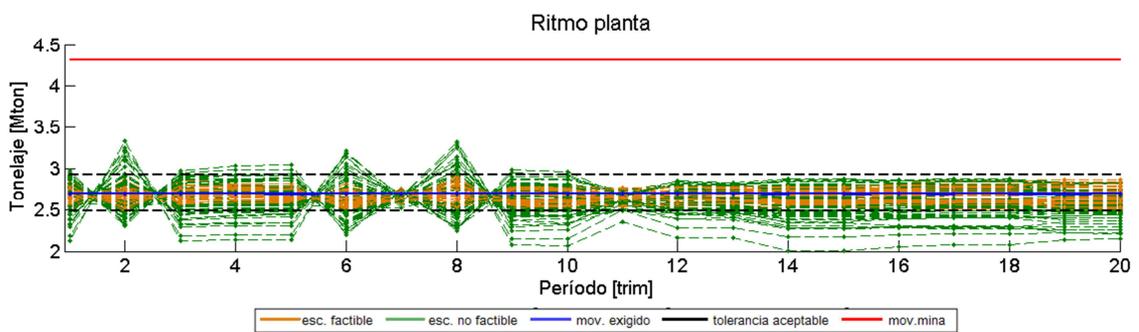
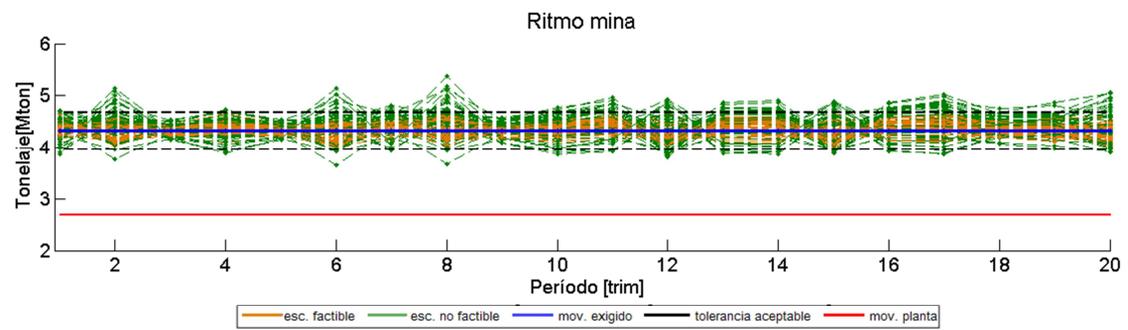
**Apéndice 16: Histograma de VPN, secuencia 98**

## Anexo C: Ritmos de producción de planes selectos

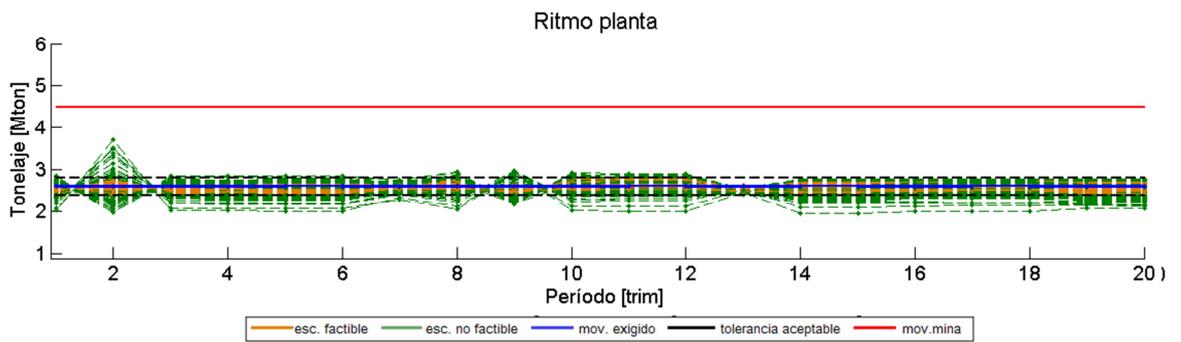
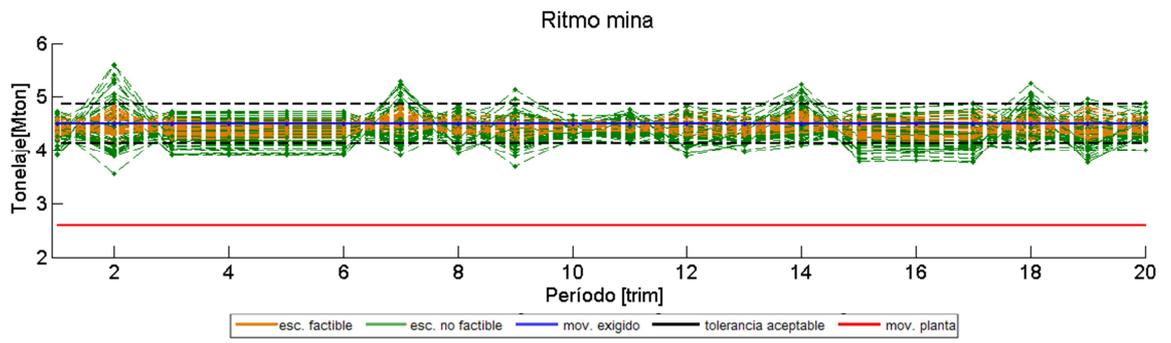
### C1: Criterio de selección I



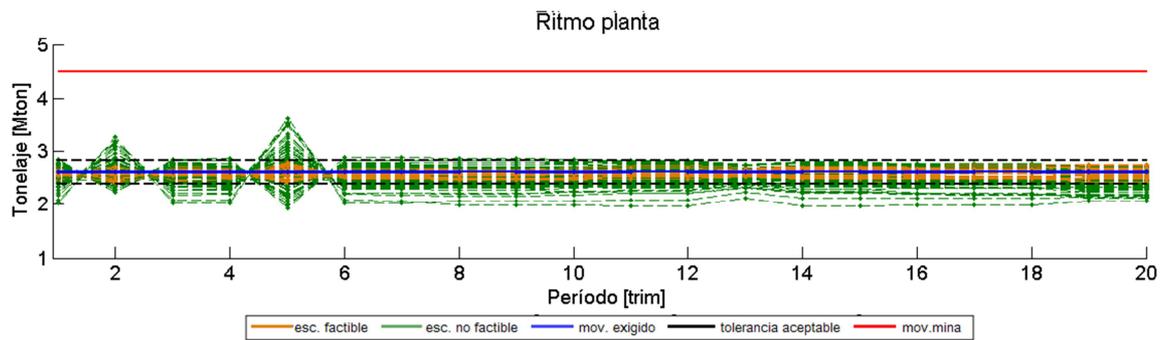
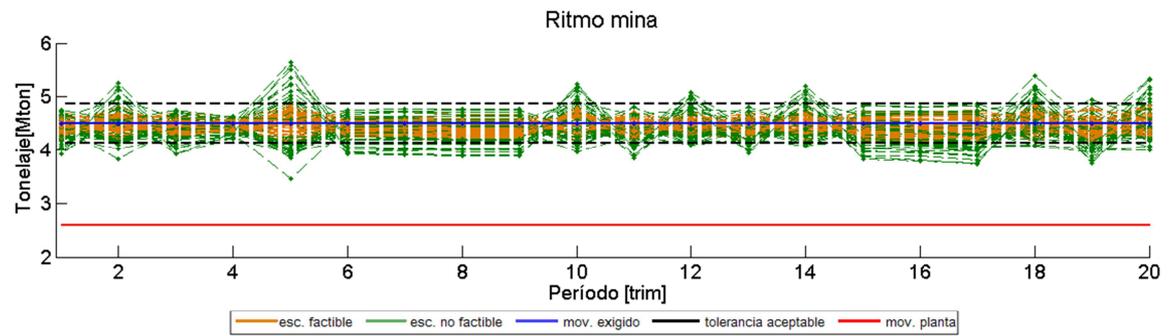
### Apéndice 17: Ritmos de producción, secuencia 7



### Apéndice 18: Ritmos de producción, secuencia 16

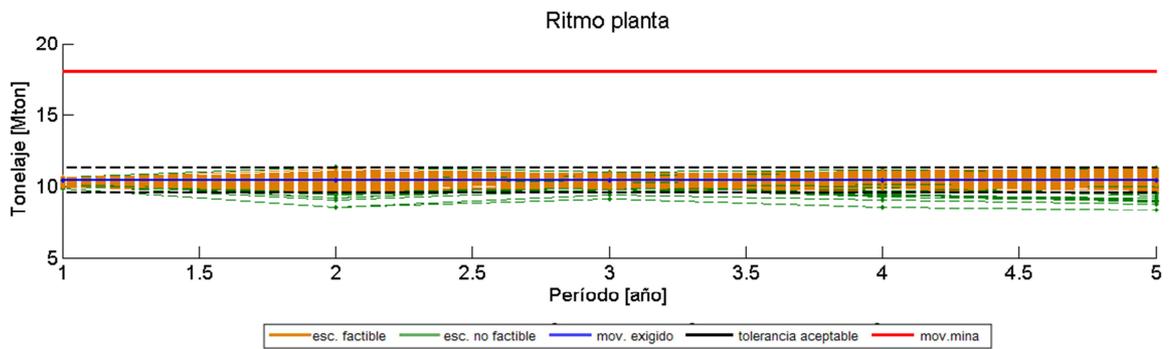
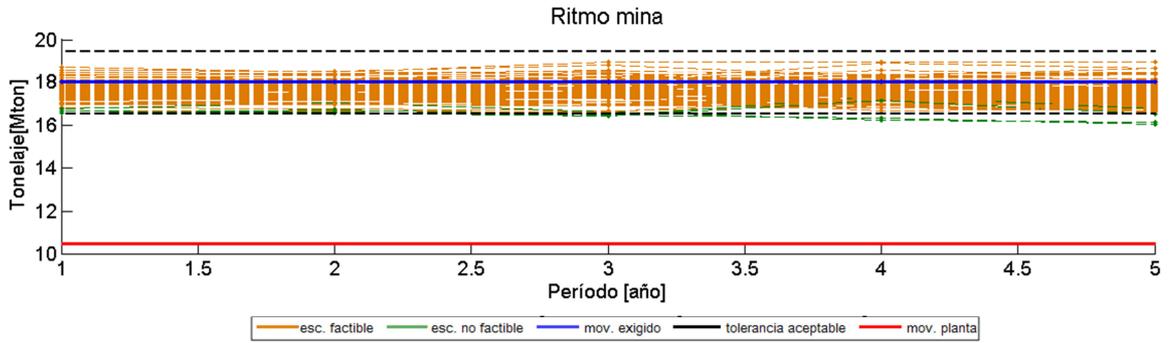


**Apéndice 19: Ritmos de producción, secuencia 60**

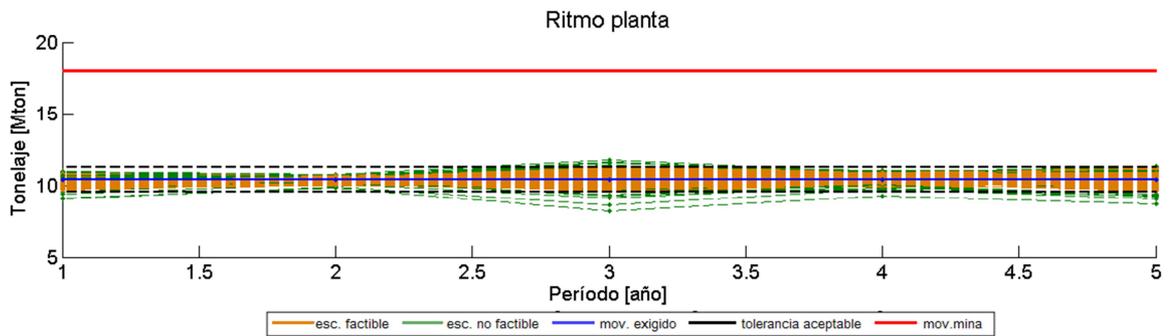
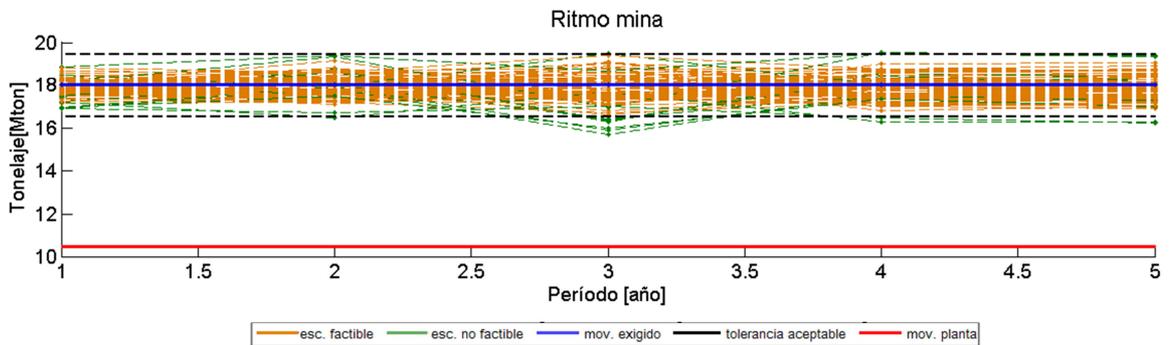


**Apéndice 20: Ritmos de producción, secuencia 65**

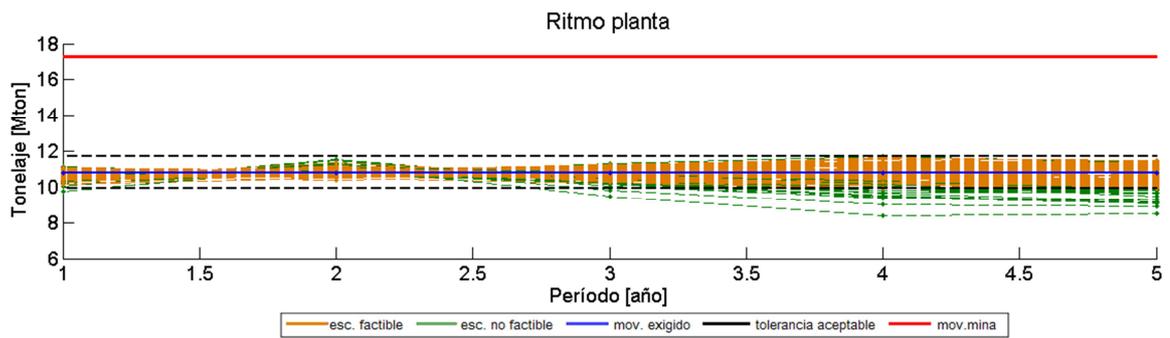
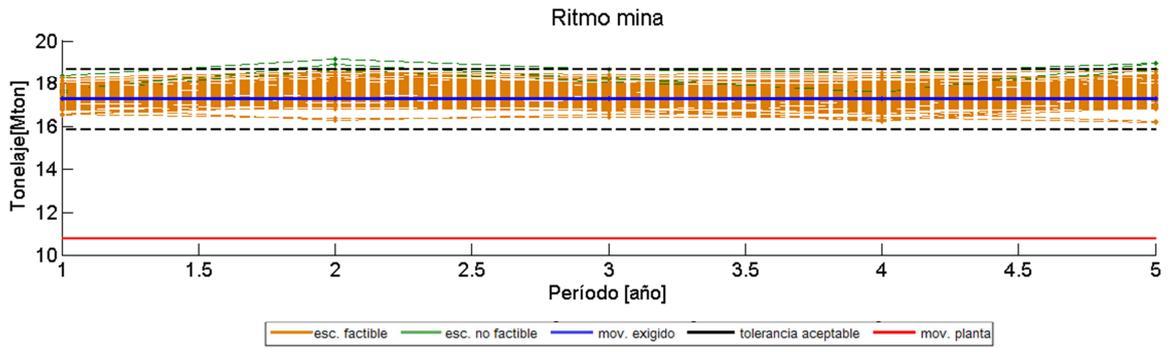
## C2: Criterio de selección II



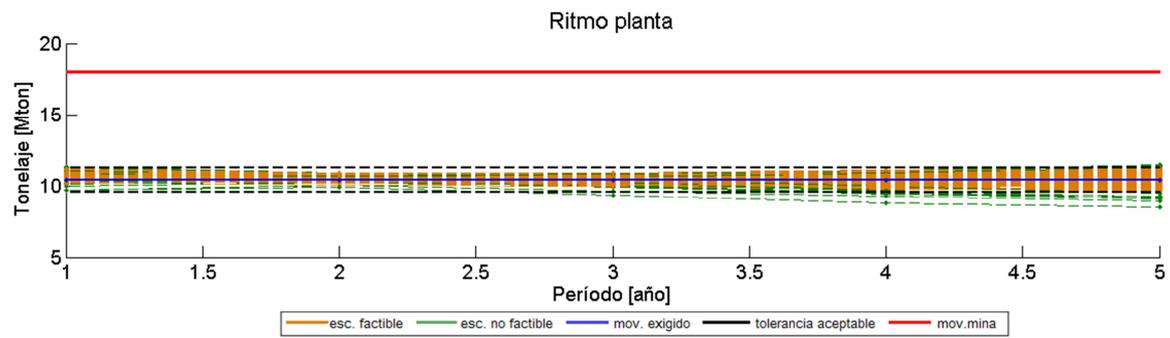
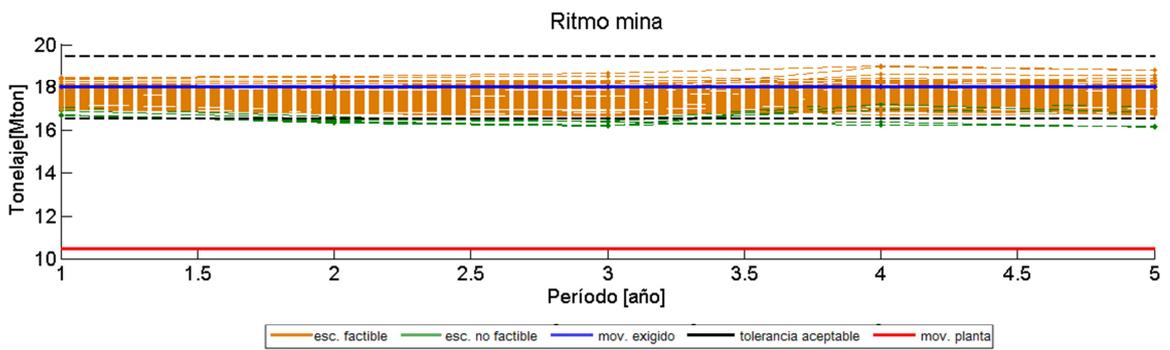
Apéndice 21: Ritmos de producción, secuencia 7



Apéndice 22: Ritmos de producción, secuencia 8



Apéndice 23: Ritmos de producción, secuencia 48



Apéndice 24: Ritmos de producción, secuencia 86