



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

CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE CRITERIOS EN EL PROCESO DE  
EVALUACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE MINAS A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FELIPE IGNACIO CONTADOR DUQUE

PROFESOR GUÍA:

CRISTIAN POBLETE MATAMALA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALEJANDRO CÁCERES SAAVEDRA

MARÍA ANGÉLICA GONZÁLEZ FUSTER

SANTIAGO DE CHILE

2018

## **CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO DE CRITERIOS EN EL PROCESO DE EVALUACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE MINAS A CIELO ABIERTO**

La evaluación de un proyecto minero depende de diversas dimensiones técnicas que permiten encontrar una correcta secuencia de explotación del yacimiento, estas corresponden a la estimación de recursos, geomecánica, metalurgia y modelos técnicos-económicos. La generación de un plan estratégico depende de la toma de decisiones realizada en distintos aspectos de las dimensiones mencionadas, donde los criterios utilizados están basados en la experiencia técnica y el conocimiento del depósito. Esto es una práctica instaurada en la industria y su aplicación desencadena efectos no cuantificados en etapas posteriores de la evaluación del proyecto. Es por esto, que la metodología propuesta pretende incorporar sensibilizaciones en los parámetros críticos de las dimensiones aludidas, estableciendo variaciones de estos para concebir múltiples planes de producción, que permitan vislumbrar todos los escenarios posibles.

El objetivo de este trabajo consiste en una metodología que logre realizar un análisis de sensibilidad múltiple que permita valorizar el impacto de todos los criterios considerados en el proceso de evaluación y planificación de minas a cielo abierto, incluyendo la interdependencia entre los diversos parámetros a emplear y los indicadores evaluados. El estudio pretende comprender la influencia de las variables dentro del marco de la planificación estratégica; si bien el trabajo se basa en los impactos en el VPN, es necesario fundamentar los resultados en los distintos indicadores técnicos (LOM, razón estéril-mineral, etc.) y económicos (TIR, *payback*).

La metodología es aplicada en dos casos de estudio para comprender el efecto en dos depósitos con características disímiles, donde se obtienen cambios sustanciales en la valorización económica cuando se realizan sensibilizaciones del precio del cobre (del orden de 40% en VPN). Otro efecto importante está dado por las escalas de producción, ya que al variar estos se consigue aumentar el VPN en un 30-35%, mejorando parámetros técnicos como la razón estéril mineral y LOM. También, las alteraciones son percibidas en el plan de producción, donde varían los tonelajes de las fases, existiendo planes que no son totalmente operativos.

Efectos significativos se dan en el caso de las perturbaciones realizadas en la geomecánica, donde alteraciones en la inclinación provocan resultados dispares, cambiando enormemente el tonelaje del *pit* final, VPN, etc. Además, es necesario recalcar la interacción entre la estimación de los recursos y la planificación, donde el impacto de los criterios geoestadísticos depende claramente del depósito, ya que, para yacimientos más heterogéneos, el impacto de la información utilizada es alta, originando alteraciones en el VPN (hasta un 7%) y en el resto de los indicadores estudiados. Incluso, la estimación genera cambios en la distribución de las leyes y esto es advertido en los distintos planes de producción, donde varía el uso de las pilas de *stock*, ya que en algunos modelos el acopio es aprovechado en los primeros años y en otros, su empleo es más homogéneo en los periodos o es guardado para alimentar la planta en periodos finales.

Finalmente, es imperante recalcar que la metodología expuesta debe ser considerada en todos los proyectos mineros que están en etapa de evaluación, para poder entrever y comprender previamente todos los escenarios posibles a los que se enfrenta el planificador y también permite establecer el énfasis requerido en los criterios que impliquen una mayor incidencia en el valor y planificación de un proyecto.

## **QUANTIFICATION OF THE IMPACT OF CRITERIA IN THE EVALUATION AND PLANNING OF OPEN PIT MINES**

Mining projects depends on several technical dimensions that allow a correct evaluation of mineral extraction from the orebody, these are geostatistics, geomechanic, metallurgy and technical-economics models. The evaluation of a mining project depends on different criteria in the areas mentioned that are based on the knowledge and technical experience of the deposits. These criteria are established by decisions defined by a "Human Factor" and its application triggers unquantified effects in different mining stages. Therefore, what the methodology aims to incorporate is sensitization in the critical parameters of all the dimensions, establishing several variations that generate multiple scenarios to evaluate the incidence of variables.

The main objective of this paper is to establish a methodology that achieves multiple sensitivity analysis that allow to quantify the impact of all the variables considered in the stages in open pit mine planning. The study allows to understand the influence of variables and its interdependence on the strategic planning, in which it is possible to analyse mainly the fluctuation in NPV, but it is also necessary to evaluate all indicators, both technical (life of mine, stripping ratio, etc.) and economics (TIR, payback)

The methodology is carried out in two case studies (copper/silver and copper/gold orebodies with different characteristics). When the price of copper changed, in both cases there are considerable fluctuations in the NPV, increasing by 40%. Another effect to emphasize is related to production scales, when an optimization these variables allow to increase the NPV by 30-35% and generates improvements in technical parameter, like a stripping ratio and LOM. These changes impact at the local scale, leave in evidence plans that have pushbacks with a large amount of material, which causes them to be not optimal neither operative.

Important effects arise from variations in geomechanical parameters, where changes in the slope cause diverse results, greatly altering in tonnage and shape of final pit, stripping ratio, NPV, etc. In addition, the impact of geostatistical criteria clearly depends on the deposits; in more heterogeneous orebodies, the impact of the information used (maximum samples number) is high, causing changes in the value (up to 7%) and in the rest of indicators. For this, the interaction between the estimation of resources and planning must always be studied. Also, this estimation produces variations in the distribution of the cut off and this is evidenced in the different production plans, where the use of stockpile varies, since for some models this material is used in the first years, in others, its use it is more homogeneous in the several periods or is saved to feed the plant in final periods.

In conclusion, it is important to emphasize that the methodology must be considered in all mining project that are in the valuation stage, in order to be able to perceive and understand previously all the possible planning scenarios and also allow to establish the required emphasis in the criteria that imply a greater impact on the value and planning of a project.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi padre y mi madre, Víctor y Doris, por darme la vida, amor, felicidad, educación y grandes enseñanzas que me permitieron ser quien soy, gracias por todo el sacrificio y la paciencia. A mi hermana Catalina, con quien he crecido y he aprendido todos estos años. Los amo con todo mi corazón.

A mis abuelos y abuelas, que han sido y fueron un gran apoyo en todos los momentos, especialmente en instantes de estrés de la época universitaria, abrazo al cielo al que ya partió, gracias infinitas. A mi familia, a mis tíos, tías y primas que siempre han estado y esperan lo mejor de mí; en especial a Paulina por compartir todas las mañanas de viaje al trabajo en este último periodo.

A mi polola Marjorie, el pilar fundamental en este último periodo universitario, acompañándome y soportándome en momentos de estrés, gracias infinitas, te amo.

Agradecer a mi profesor guía Alejandro por su disposición, consejos y ganas de tomar el desafío a pesar del poco tiempo con el que disponía.

A Cristian por ser el encargado de enseñarme muchas cosas en el ámbito minero y estar siempre disponible para todas las consultas que surgieron en el camino.

A María Angélica, por los consejos cada vez que lo solicité, por la experiencia que transmitió y la disposición entregada.

A todo el equipo de Dassault Systemes Chile, en especial a los que compartí día a día y me hicieron sentir parte de la empresa desde el primer día; Iván, Rodrigo, Carmen, Fabrizio y Mariana, gracias.

A todo el departamento de Ingeniería de Minas por la gran formación académica que me brindaron en estos años de estudio, a toda su gente que siempre estuvo dispuesta a solucionar los diversos problemas.

Finalmente agradecer a todos mis amigos y amigas que me acompañaron en el proceso universitario, partiendo por “Skal”, los amigos de toda la vida, compañeros en carrete y deporte. Amigos de la Sección 7 de la facultad, grandes personas que han aportado enormemente a mi formación personal. Y a mis amigos mineros, “Los Lelones”, con los cuales compartí los últimos años y se transformaron en gran apoyo para afrontar las dificultades diarias de la carrera.

# TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo general .....	3
1.1.2. Objetivos específicos .....	3
1.2. Alcances .....	3
2. ANTECEDENTES .....	5
2.1. Estimación de recursos.....	5
2.2. Planificación minera.....	8
2.2.1. Planificación minera operativa .....	8
2.2.2. Planificación minera táctica.....	8
2.2.3. Planificación minera estratégica .....	9
2.2.4. Elección de fases y secuenciamiento .....	10
2.2.5. Algoritmos de secuenciamiento.....	10
2.2.6. Evaluación de los planes.....	11
2.3. Definición de criterios utilizados en planificación estratégica.....	12
2.3.1. Geomecánica.....	13
2.3.2. Metalurgia .....	14
2.3.3. Parámetros técnico-económicos.....	15
2.4. Diseño robusto.....	17
2.5. Diseño de experimentos .....	18
2.6. Programas utilizados .....	19
3. METODOLOGÍA PROPUESTA .....	20
3.1. Estimación de leyes.....	20
3.2. Planificación estratégica.....	22
3.2.1. Definición de variables .....	22
3.2.2. Generación de <i>Pit Shells</i> .....	22
3.2.3. Estimación del CAPEX.....	23
3.2.4. Secuenciamiento .....	24
3.3. Evaluación de las estrategias.....	25
3.4. Resumen.....	26
4. CASO 1: DEPÓSITO 01 .....	27
4.1. Modelo Base.....	27
4.1.1. Estimación.....	27

4.1.2.	Análisis geoestadístico.....	28
4.1.3.	Planificación .....	28
4.2.	Resultados MODELO 01 .....	31
4.2.1.	Estimación.....	31
4.2.2.	Planificación .....	34
5.	CASO 2: MODELO 02.....	44
5.1.	Modelo Base.....	44
5.1.1.	Estimación de recursos .....	44
5.1.2.	Análisis Geoestadístico de datos.....	45
5.1.3.	Planificación .....	45
5.2.	Resultados MODELO 02 .....	49
5.2.1.	Planificación .....	53
5.3.	Resumen .....	61
6.	ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA .....	63
7.	CONCLUSIONES .....	68
8.	RECOMENDACIONES .....	70
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	71
10.	ANEXOS .....	73

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Componentes del variograma.....	6
Figura 2-2. Modelos de variograma. Izquierda: Variograma esférico. Centro: Variograma exponencial. Derecha: Variograma gaussiano.....	7
Figura 2-3. Tipos de extracción. Izquierda: <i>Best case</i> . Derecha: <i>Worst case</i> .....	10
Figura 2-4. Esquema global del <i>pit</i> .....	13
Figura 2-5. Hill of Value.....	15
Figura 2-6. Proyección precio del cobre.....	17
Figura 2-7. Diseño Robusto.....	18
Figura 2-8. Razón Señal Ruido.....	18
Figura 3-1. Inversión estimada a partir de mineral tratado anualmente.....	23
Figura 3-2. Flujo de trabajo en Isight.....	25
Figura 3-3. Indicadores de desempeño.....	25
Figura 3-4. Resumen metodología.....	26
Figura 4-1. Izquierda: Mapa variográfico. Derecha: Variograma modelado.....	27
Figura 4-2. Curva Tonelaje - Ley del modelo 01.....	28
Figura 4-3. Plan de producción Caso Base, Modelo 01.....	30
Figura 4-4. Fases Modelo 01. Izquierda: Vista en planta. Derecha: vista perfil.....	31
Figura 4-5. Razón Estéril Mineral de las fases.....	31
Figura 4-6. Vista en planta del depósito. Izquierda: Modelo base. Central: Sensibilización 01 (variaciones de -20%). Derecha: Sensibilización 27 (variaciones de +20%).....	32
Figura 4-7. Plan de producción, Sensibilización 01.....	32
Figura 4-8. Plan de producción, Sensibilización 27.....	32
Figura 4-9. Sensibilización de variables de estimación. Izquierda: Impacto en el VPN. Derecha: Impacto en el <i>payback</i> .....	33
Figura 4-10. Interdependencia en la estimación. Izquierda: Impacto en VPN (número máximo de muestras y alcance del variograma). Derecha: Impacto en VPN (alcance del variograma y efecto pepita).....	34
Figura 4-11. Sensibilización en estimación. Impacto en cobre recuperado.....	34
Figura 4-12. Histograma VPN.....	35
Figura 4-13. Sensibilización de parámetros planificación. Impacto en VPN.....	35
Figura 4-14. Pareto variables planificación. Impacto en VPN.....	36
Figura 4-15. Sensibilización variables planificación. Impacto en TIR.....	36
Figura 4-16. Pareto sensibilización variables de planificación. Izquierda: Impacto en LOM. Derecha: Impacto en SR.....	37
Figura 4-17. Sensibilización en variables de planificación. Impacto en tonelaje de <i>pit</i> final.....	38
Figura 4-18. Sensibilización según geomecánica. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en cobre fino recuperado.....	38
Figura 4-19. Sensibilización según ángulo. Impacto en VPN y cobre fino recuperado.....	39
Figura 4-20. Nivel de coincidencia de los <i>pits</i> variando ángulos. Izquierda: comparación entre <i>pits</i> con 46° y 48°. Central: comparación entre <i>pits</i> con 46° y 50°. Derecha: comparación entre <i>pits</i> con 48° y 50°.....	40
Figura 4-21. Sensibilización de costos. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en vida de la mina.....	40
Figura 4-22. Variación del VPN según escalas de producción.....	41
Figura 4-23. IVAN.....	43
Figura 4-24 . Pareto interdependencia de variables de planificación.....	43

Figura 5-1. Izquierda: Mapa Variográfico. Derecha: Variograma modelado.....	44
Figura 5-2. Curva Tonelaje - Ley del Modelo 02 .....	45
Figura 5-3. Gráfico <i>pit by pit</i> modelo 02 .....	47
Figura 5-4. Fases del Modelo 02.....	47
Figura 5-5. Razón estéril mineral por fases. Caso Base .....	48
Figura 5-6. Plan de producción - Caso Base.....	48
Figura 5-7. Sensibilizaciones del kriging ordinario. Izquierda: Modelo base. Centro: Pepita 0.024, alcance 80, número muestras 12. Derecha: Pepita 0.036, alcance 120, número muestras 18 .....	49
Figura 5-8. Plan de Producción - Sensibilización 01 .....	50
Figura 5-9. Plan de Producción - Sensibilización 27.....	50
Figura 5-10. Sensibilización de variables de estimación. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en SR.....	51
Figura 5-11. Sensibilización modelo variográfico. Impacto en el VPN .....	51
Figura 5-12. Sensibilización en el tamaño del <i>pit</i> final .....	52
Figura 5-13. Nivel de coincidencia de los <i>pits</i> generados por la estimación de los recursos. Izquierda: Modelo Base y Sensibilización 01. Central: Modelo Base y Sensibilización 27. Derecha: Sensibilización 01 y Sensibilización 27 .....	52
Figura 5-14. Histograma VPN Modelo 02.....	53
Figura 5-15. Sensibilización en el VPN.....	53
Figura 5-16. Pareto variables planificación. Impacto en VPN .....	54
Figura 5-17. Pareto sensibilización en indicadores técnicos. Izquierda: Impacto en LOM. Derecha: Impacto en SR.....	55
Figura 5-18. Impacto en SR.....	55
Figura 5-19. Sensibilización variables de planificación. Impacto en tonelaje <i>pit</i> final .....	56
Figura 5-20. Sensibilización según geomecánica. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en razón estéril-mineral.....	57
Figura 5-21. Sensibilización del ángulo. Impacto en VPN y cobre fino recuperado.....	57
Figura 5-22. Sensibilización en los costos. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en TIR .....	58
Figura 5-23. Sensibilización precio y escalas de producción. Impacto en VPN .....	58
Figura 5-24. IVAN.....	60
Figura 5-25. Pareto incidencia en VPN de interdependencia de parámetros planificación.....	61
Figura 5-26. Comparación depósitos .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Escenarios en Diseño de Experimentos.....	18
Tabla 3-1. Escenarios de estimación.....	21
Tabla 3-2. Escenarios de planificación .....	24
Tabla 3-3. Extracto de tabla utilizada en la planificación.....	25
Tabla 4-1. Parámetros de la estimación de recursos .....	27
Tabla 4-2. Estadísticas básicas Modelo 01 .....	28
Tabla 4-3. Parámetros utilizados en la metodología de sensibilización .....	29
Tabla 4-4. Otros parámetros planificación.....	30
Tabla 4-5. Resultados Escalas de producción.....	42
Tabla 5-1. Parámetros de la estimación de recursos .....	44
Tabla 5-2. Estadísticas básicas modelo 02.....	45

Tabla 5-3. Parámetros utilizados en la metodología de sensibilización .....	46
Tabla 5-4. Otros parámetros planificación.....	46
Tabla 5-5. Comparación de escalas de producción.....	59
Tabla 5-6. Comparación entre ambos depósitos .....	62

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1. Variograma experimental .....	6
Ecuación 2-2. Kriging ordinario .....	7
Ecuación 2-3. Propiedades kriging ordinario.....	8
Ecuación 2-4. Valorización de un bloque .....	9
Ecuación 2-5. Valor Presente Neto .....	11
Ecuación 2-6. Tasa interna de retorno .....	11
Ecuación 2-7. IVAN .....	12
Ecuación 3-1. Estimación del CAPEX .....	23

# 1. INTRODUCCIÓN

La planificación cumple un rol fundamental dentro del proceso minero, ya que entrega las bases de cómo y cuándo extraer los recursos minerales presentes en el yacimiento; este proceso consiste en una serie de pasos que pretenden cumplir los objetivos planteados por la compañía, maximizando los beneficios que pueden obtenerse de la explotación del depósito. Con respecto a esto, se puede planificar en diferentes escalas de tiempo, desde lo que ocurre durante el turno, hasta llegar a proyectarse durante toda la vida operativa de la mina. Teniendo en cuenta un horizonte de largo plazo, la planificación estratégica minera a cielo abierto permite la evaluación del depósito desde sus inicios, accediendo a la toma de decisiones pertinentes, para formar la estrategia de explotación que logre la optimizar la generación de valor.

Según Erdem, Güyagüler y Demirel (2012), “la minería es una industria muy riesgosa en comparación con otras, ya que factores como la estimación de los recursos y de toma de decisiones, deben considerar muchos parámetros inciertos” (p.405). Los procesos críticos dentro de la minería presentan diversas fuentes de incertidumbre, destacando la incertidumbre geológica y de mercado. Específicamente, la planificación estratégica se basa en diversos criterios arrastrados de las fuentes de incertidumbre, donde muchos parámetros (definidos a partir de estos criterios) son asumidos con un grado de certeza, pero que no representan cabalmente la realidad. Dichos criterios están basados en la experiencia y conocimiento técnico de expertos; es por esto, que el “factor humano” en la toma de decisiones adquiere real importancia al ser clave para la generación de los parámetros que definen los distintos niveles de la evaluación y planificación de un proyecto.

Dentro de la planificación estratégica, existe un gran nivel de riesgo, asociado a la incertidumbre y al factor humano, debido a que habitualmente se realizan simplificaciones para abordarla de manera más rápida, por lo que muchas veces no es incorporado totalmente lo que ocurre en el depósito y/o no se utilizan los valores óptimos de todas las variables, al subestimar (o sobreestimar) estas.

Los criterios en la evaluación y planificación de un proyecto minero son principalmente la evaluación geoestadística, geomecánica, metalurgia y el modelo técnico-económico. La principal variabilidad en el plan minero viene dada por errores en la toma de decisiones y errores arrastrados por la incertidumbre; donde diversos autores (Abdel Sabour & Dimitrakopoulos, 2011; Dimitrakopoulos, Farrelly & Godoy, 2002 y Morales & Rubio, 2010) señalan como la principal fuente de dicha incertidumbre, la estimación de los recursos, al no tener noción completa del comportamiento del yacimiento. La otra fuente de incertidumbre es el mercado, ya que el precio de los diversos *commodities* es muy volátil, dependiendo de diversos factores externos, donde no se previene el real comportamiento de estos. Factores como el mercado, proveedores, inversionistas, estabildades políticas, etc., generan la incertidumbre asociada al precio de los diversos metales, haciendo que se deba estar en constante evaluación del beneficio que se obtiene en cada proyecto minero.

La planificación toma como base un modelo de bloques proveniente de la estimación y clasificación de recursos; en estas etapas, la incertidumbre geológica adquiere vital importancia, ya que corresponde a una representación del comportamiento espacial y de la distribución de leyes de los minerales. Además de esto, la estimación depende de las decisiones técnicas que modelan el variograma, seleccionan la existencia de anisotropías en el depósito, entre otras, pero ¿cómo se asegura el ingeniero que la opción escogida es la correcta?, la mala elección de algún parámetro en específico, ¿cuánto afecta en etapas posteriores?

Los valores geomecánicos utilizados son entregados a partir de diversos estudios realizados para mantener una estabilidad local y global dentro del yacimiento, tomando en cuenta criterios para ángulos, alturas de talud y consideraciones de bancos. La determinación de estos factores viene dada por diversos criterios de aceptabilidad del yacimiento, donde principalmente recaen en un factor de seguridad tolerable. Este factor logra asegurar la estabilidad de la mina a cielo abierto, pero existen ciertos criterios que establecen factores más o menos conservadores dependiendo de lo que se requiera, por lo tanto, nuevamente el criterio humano en la toma de decisiones es un fundamento crítico, ya que esto desencadena los valores que tendrán los parámetros geomecánicos empleados en la planificación; por ejemplo, en la generación de los *pits* anidados se dispone de una cantidad de bancos determinada para el ángulo escogido, ¿qué sucede si este ángulo sufre pequeñas modificaciones?, ¿qué ángulo se debe utilizar en la etapa de planificación estratégica?

Los parámetros más relevantes de la metalurgia son la recuperación y ley de los minerales del depósito; la primera es asumida como constante y conocida para la valorización del bloque en la planificación (Carrasco, Chiles y Séguret 2008), ya que es una cantidad no aditiva, por lo que no se aplica movilidad en la formación de planes estratégicos, ¿Cuánto incide en la planificación, una mayor variación de la recuperación establecida? Por otro lado, ¿qué ocurre si es definida como función del modelo? Para comprender la influencia de la ley del mineral, inicialmente, se dispone de una ley de corte marginal que determina lo que incluye la envolvente económica, pero no necesariamente esta ley genera el mayor beneficio del yacimiento ¿qué sucede si se aumenta la ley de corte?

Los criterios técnicos muchas veces son asumidos como base para realizar la planificación (capacidad de minado y planta), pero no necesariamente se percibe si la configuración escogida es o no la mejor opción. Si se planifica extraer (o procesar)  $\pm 10\%$  más de mineral, ¿Cuánto cambia la calidad de un proyecto? Con respecto a las variables económicas, los costos de minado y procesamiento son definidos a como “dependientes” del comportamiento del mercado y del yacimiento. Por ejemplo, numerosas veces se considera que el costo mina aumenta a medida que se profundiza en el yacimiento, pero el valor inicial, ¿es el correcto?, ¿Cuánto incide variaciones del costo de procesamiento del mineral?

Otro aspecto distinguible en el proceso de planificación es la incertidumbre del mercado, donde la volatilidad del precio de los metales provoca grandes desviaciones en la valorización de un yacimiento. En efecto, existen diversas formas para modelar el precio del cobre, que permiten evaluar un proyecto minero para un corto periodo de tiempo, pero al ser dependiente de diversas fuentes externas, es sumamente complicado estimar correctamente el comportamiento del precio del cobre a mediano y largo plazo.

McCarthy (2010) señala que “gran parte de los estudios realizados están limitados por tiempo, presupuesto y poco conocimiento de los datos, por lo que no se logra establecer cuan mejor podría ser un proyecto” (p.2); por lo que se hace imperioso realizar diversos análisis y sensibilizaciones para estar en la mayor cantidad de casos posibles para determinar la o las mejores alternativas de la planificación minera.

El trabajo de memoria consiste en la generación de múltiples escenarios que permiten la comparación de planes en términos económicos, como la maximización del VPN o encontrar el mejor *payback* y condiciones operativas, tales como, mantener tasas de extracción constantes, aplazar la vida útil de la mina, controlar la razón estéril-mineral, observar cambios en la forma y tamaño del *pit* final, etc. Utilizando los *softwares* GEOVIA-Surpac<sup>TM</sup>, GEOVIA-Whittle<sup>TM</sup> y SIMULIA-Isight<sup>TM</sup> se logran aplicar diversas sensibilizaciones en las distintas variables que

inciden en la planificación estratégica de minería a cielo abierto, permitiendo cuantificar estas e identificar cuáles son las más críticas dentro del proceso de evaluación y planificación de un proyecto minero.

El trabajo realizado se divide en siete grandes capítulos, comenzando por una introducción y contexto en que es inmerso este trabajo. Seguido por el capítulo Antecedentes, el cual presenta el estado del arte y marco teórico de la planificación minera y los parámetros que influyen, desde la estimación de recursos hasta incertidumbre de mercado.

El capítulo Metodología describe los pasos a seguir para la resolución del tema planteado.

Los capítulos Casos retratan lo sucedido en los escenarios donde será aplicada la metodología propuesta, así poder evaluar el impacto en dos depósitos con características distintas.

El capítulo Análisis de la Metodología presenta los resultados estudiados y comparados de la metodología propuesta, realizando una discusión entre lo que se obtiene en ambos modelos estudiados.

Finalmente, el último capítulo señala las conclusiones de lo propuesto y entrega recomendaciones para trabajos posteriores.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Desarrollar una metodología que permita realizar un análisis de sensibilidad múltiple y evaluar el impacto de los criterios utilizados en cada una de las dimensiones técnicas estudiadas, en el marco de un plan estratégico en minería a cielo abierto.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Integrar la sensibilización en distintas etapas de evaluación y planificación de un proyecto minero.
- Revisar el impacto de las variaciones de los distintos criterios en la valorización de un plan, a nivel económico y operativo.
- Establecer la existencia de interdependencia entre los diversos parámetros que definen la planificación estratégica.
- Incluir el riesgo asociado a la toma de decisiones (factor humano), en etapas críticas de la planificación.

## **1.2. Alcances**

- Estudio realizado para minería a cielo abierto, contemplando solo horizonte de planificación estratégica, por ende, quedan fuera del estudio la planificación táctica y operativa, así como la planificación en minería subterránea. De aquí en adelante, cuando se mencione esto, solo compete a minería a cielo abierto.
- No se ahonda en diseño minero, por lo que no se hace uso de rampas, ni de ningún otro criterio utilizado en el diseño que no competa la planificación estratégica. Cabe mencionar que sí se emplean restricciones operacionales, como anchos mínimos, restricciones de bancos, entre otros.; elementos útiles para una correcta planificación.

- Las variaciones de los parámetros están realizadas a partir de un caso base, incluyendo fluctuaciones de hasta  $\pm 25\%$  en cada uno. Es un trabajo orientado a la planificación estratégica, por ende, estas fluctuaciones pueden no ser completamente representativas de otras etapas.
- No se considera la incertidumbre proveniente del nivel de información ni la variabilidad del fenómeno, por lo cual no son realizadas simulaciones condicionales para la geología y leyes del yacimiento. Tampoco es considerado el nivel de calidad de información de los sondeos utilizados.
- La revisión utiliza dos casos de estudios de yacimientos con características específicas, ya que la metodología no obtendrá los mismos resultados en condiciones distintas (tipo de yacimiento, consideraciones técnicas, etc.).
- Se contempla el uso de *stockpiles* en el proceso de planificación, además se establecen límites para estos, para representar con mayor confiabilidad la realidad.
- Estimación y clasificación de recursos son realizadas en el *software* GEOVIA-Surpac™, la planificación estratégica se efectúa bajo el algoritmo *Milawa NPV*, aplicando GEOVIA-Whittle™. Mientras que la generación y automatización de múltiples escenarios y planes es ejecutada en SIMULIA-Isight™. Los tres *softwares* utilizados son pertenecientes a DASSAULT SYSTEMÈS.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Estimación de recursos

Según Emery (2013), la estimación es parte fundamental de la geoestadística, la cual “consiste en evaluar, de la manera más precisa posible, un valor que no ha sido medido, a partir de los datos disponibles” (p 4). Entonces, es característico de la geoestadística realizar estimaciones lo más exactas posibles, para disminuir la incertidumbre geológica existente.

Entiéndase por incertidumbre, como el desconocimiento parcial en los resultados finales del modelo, esta incerteza viene dada por el poco nivel de información que se posee y la variabilidad (cuanto cambia un atributo en el tiempo y/o espacio) del fenómeno a modelar (Cáceres, 2017). Por lo tanto, la incertidumbre geológica es la incerteza de lo que realmente ocurre en el yacimiento, ya sea por la diversidad espacial de las leyes y/o por la cantidad de mineral que posea el depósito.

La incorporación de la incertidumbre geológica en la planificación minera es descrita desde diversos puntos de vista por diferentes autores. Por ejemplo, Dimitrakopoulos et al. (2002), señalan que “tener una evaluación precisa de la incertidumbre de la variabilidad que surge de las leyes en las reservas del mineral, permite que el riesgo en un proyecto minero sea cuantificado y considerado en la toma de decisiones” (p.87). Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, es que existen distintos estudios para establecer la incidencia de la alteración de parámetros geoestadísticos a través de nuevas metodologías. Bajo este concepto Abdel Sabour y Dimitrakopoulos (2011) señalan que se han dedicado esfuerzos para desarrollar un enfoque que integra estos riesgos geológicos en la planificación, logrando aumentar el VPN de los proyectos sobre un 25%. Esto se realiza a partir de estimaciones o simulaciones más certeras y que utilicen la mayor cantidad de información disponible dentro del depósito, así se aprovecha en gran medida todos los factores que competen a la estimación.

Los atributos del depósito (leyes, densidad, tipo de roca, etc.) son obtenidos a partir de campañas de sondajes, lo que implica que no se conozca a cabalidad la variabilidad espacial de estos atributos; esta falta de información del depósito puede repercutir en etapas posteriores de la evaluación de un proyecto. El uso de *kriging* o simulaciones, genera la obtención de modelos de bloques que serán la base para ser utilizados en la planificación estratégica, por lo que la incorporación del estudio de la incertidumbre geológica permite abordar correctamente los procesos posteriores.

Sinclair y Blackwell (2002) señalan que la aplicación cuidadosa de los procedimientos geoestadísticos puede minimizar muchos o todos los problemas inherentes de los enfoques subjetivos de la estimación de los recursos. Es por esto, que además de la incertidumbre mencionada, los problemas en la estimación de recursos se basan en malas elecciones humanas, donde los criterios empleados pueden estar sesgados y no necesariamente representarán de mejor manera la disposición espacial de los elementos.

Para poder realizar una buena estimación de los recursos, es necesario que los parámetros que la definen sean establecidos coherentemente; en este sentido, el análisis variográfico cumple un rol fundamental para la posterior estimación de las leyes del depósito.

La geoestadística considera la distribución espacial (y temporal) del fenómeno que se estudia, con lo que se permite inferir la variabilidad de la variable regionalizada ( $z$ ) en cuestión, entregando una descripción sintética de la continuidad espacial de esta, quedando definida por el variograma. El variograma experimental es el obtenido por estimación a partir de los datos disponibles, definido

por la Ecuación 2-1 donde N es el número total de pares  $z(x_i)$  y  $z(x_i+h)$  separados a una distancia h. Según Emery (2013) “El variograma experimental para un vector h puede interpretarse como el momento de inercia de la nube de correlacion diferida, que mide la distancia cuadrática promedio entre los puntos de la nube y la línea diagonal” (30).

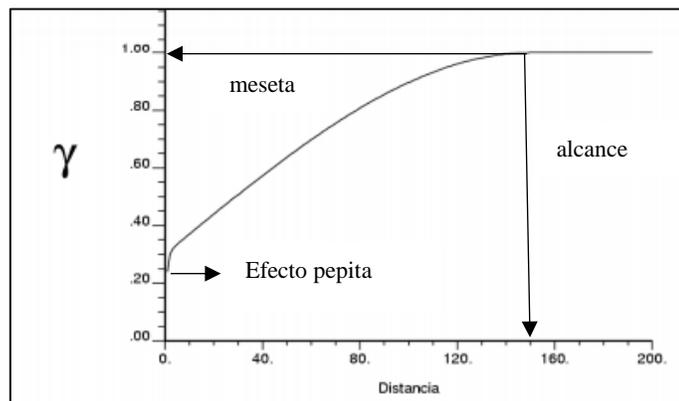
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

**Ecuación 2-1. Variograma experimental**

Este variograma depende de la distancia y dirección de interés a estudiar y de las tolerancias que se permitan en estos factores. A su vez, el mapa variográfico corresponde a la visualización en 2D del variograma experimental en las distintas orientaciones espaciales, el cual permite encontrar posibles direcciones de anisotropía existentes en el depósito.

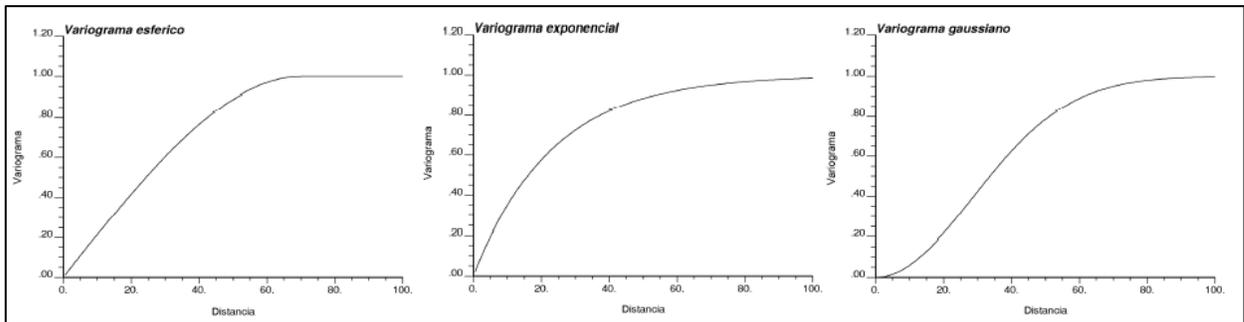
No es posible utilizar directamente el variograma experimental para la estimación de recursos, ya que está acotado para ciertas distancias y direcciones (Emery, 2013), por lo que es necesario crear un variograma modelado teórico, que permita interpretar la continuidad espacial de la variable regionalizada. Este modelo cumple con diversas propiedades para que sea definido como variable aleatoria y pueda trabajarse con él. Como es una variable espacial, posee distintos comportamientos en el origen, donde destacan comportamientos parabólicos (variable regionalizada muy regular en el espacio), lineal (continua, pero no tan regular) y discontinuo. Este último, como su nombre lo indica, corresponde a uno con discontinuidades en su distribución espacial; donde las medidas varían a pequeña escala y no se percibe continuidad en el modelo (en el origen), esto se define como “efecto pepita”.

El variograma modelado presenta un comportamiento creciente hasta estabilizarse en torno a un valor, llamado meseta y el alcance es distancia desde el origen hasta que termina este comportamiento (alcanzar la meseta). Entonces, el efecto pepita corresponde a un modelo de variograma que alcanza inmediatamente su meseta, ya que no existe correlación espacial, de ahí su nombre, ya que en yacimientos auríferos las leyes son muy dispares cuando existe una pepita de oro. Este efecto puede darse debido a existencia de micro estructuras, errores en la medición o en la ubicación de los datos (Emery, 2013).



**Figura 2-1. Componentes del variograma. FUENTE: Adaptado de Emery, 2013**

Existen ciertas funciones que son modelos válidos de un variograma y dependen de la definición de dicha función, en la Figura 2-2 se aprecian algunos de estos modelos que son los más utilizados en la práctica, además un variograma puede ser una combinación de estas estructuras y se denomina variograma anidado.



**Figura 2-2. Modelos de variograma. Izquierda: Variograma esférico. Centro: Variograma exponencial. Derecha: Variograma gaussiano**

La anisotropía es cuando los variogramas difieren en alguna de las direcciones del espacio, esta es posible identificar cuando se comparan los variogramas experimentales calculados a lo largo de distintas orientaciones espaciales, encontrando variaciones en la meseta y/o alcance de este. Además, se reconocen al encontrar zonas de dirección preferencial en un mapa variográfico. Cuando no existe anisotropía los variogramas en diferentes direcciones se superponen.

Principalmente existen dos tipos de anisotropía. La anisotropía geométrica ocurre cuando en el mapa variográfico existen elipses concéntricas y los variogramas difieren en el alcance entre uno y otro. Mientras que la anisotropía zonal no depende de una o varias coordenadas, por ende, los variogramas presentan mesetas variables en las diferentes direcciones.

La estimación “predice” el valor de la variable estudiada, a partir de la información disponible, el método comúnmente utilizado es el *kriging*, dentro de los cuales existen distintos tipos dependiendo de los datos que se posean y de lo que se pretenda estimar. El *kriging* busca una interpolación de los datos, tomando en cuenta la distancia al sitio que se desea estimar, redundancia entre los datos (agrupamiento) y la continuidad espacial (dada por el variograma).

El estimador de *kriging* debe cumplir ciertas restricciones, dentro de las cuales se encuentra la linealidad (tiene que ser una combinación lineal ponderada), debe ser insesgado (el error de estimación debe tener esperanza nula) y debe contemplar una condición de optimalidad (minimizar la varianza del error). El trabajo se lleva a cabo utilizando *krining ordinario*, en el cual se desconoce la media y está dado por los siguientes términos.

$$Z^*(x_0) = a + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

**Ecuación 2-2. Kriging ordinario**

Donde  $x_0$  es el sitio a estimar, además  $\lambda_{\alpha}$  y  $a$  son incógnitas del problema, en el cual:

$$\alpha = 0 \text{ y } \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}$$

**Ecuación 2-3. Propiedades kriging ordinario**

Según Sinclair y Blackwell (2002), errores de hasta un 25% en el alcance, la varianza del *kriging* cambia cerca de un 10%. Mientras que errores de un 25% en el efecto pepa relativo ( $C_0/C$ ), provoca mayores cambios en la varianza del *kriging*. Por lo que una subestimación del efecto pepa, puede provocar a una subestimación de esta varianza; por consiguiente, se debe prestar mayor atención a la determinación del verdadero efecto pepa.

Sumado a la incertidumbre geológica descrita, este proceso depende de diversos parámetros y criterios que son establecidos por juicio de un experto. Al ser definidos de esta manera, no se logra representar la realidad en su totalidad, debido a que muchas veces estas definiciones son aproximaciones o están acotados a ciertos márgenes. Por ejemplo, el efecto pepa incide directamente en la generación de un modelo de bloques, pero al momento de establecer el valor de este, depende de cómo y quién lo evalúa, por lo que pueden existir diferencias en el variograma estimado.

## **2.2. Planificación minera**

La planificación minera se encarga del secuenciamiento y optimización de la extracción de los minerales que existen en el yacimiento. Dicha optimización se lleva a cabo siguiendo diversos métodos y procesos para alcanzar las metas establecidas, alineándose con los objetivos de la compañía mandante; donde principalmente se persigue la maximización del valor económico del negocio, representado primordialmente por el VPN (valor presente neto). Otros beneficios buscados recaen, por ejemplo, en mantener tasas de extracción/producción constantes y/o definir la vida útil de la mina o concretar los límites del *pit* final con el que se operará.

Habitualmente, se estudian tres horizontes de planificación: a largo plazo (estratégico), mediano plazo (táctico) y a corto plazo (operacional). Estos se definen a partir de los objetivos que deben cumplir en las extensiones de tiempo que han sido determinados, es decir, la compañía define objetivos estratégicos que deben ser cumplidos a largo plazo, pero que, para llevarlos a cabo, necesitan cumplirse ciertas métricas que están establecidas para corto/mediano plazo, debido a que todos los entornos son necesarios para la obtención de la mejor tasación del recurso (Kear, 2006).

### **2.2.1. Planificación minera operativa**

La planificación minera a corto plazo relaciona las contingencias diarias dentro de la operación minera y la información recibida de la planificación táctica (Parra, 2015). Evalúa la secuencia de explotación en periodos diarios, semanales y/o mensuales, considerando los requerimientos utilizados por los equipos dentro de la operación. Por consiguiente, busca respetar correctamente los objetivos establecidos en un corto periodo de tiempo.

### **2.2.2. Planificación minera táctica**

Kear (2006), la define como el entorno donde se desarrollan e implementan las tácticas requeridas para alcanzar los objetivos estratégicos. Tapia (2015), señala que la planificación táctica "construye planes de producción orientados a obtener las metas productivas en el corto plazo definidas en el largo plazo" (p.4). La planificación táctica se enmarca en un mediano plazo, entendiéndose

principalmente en un horizonte de uno a cinco años, lo cual permite que exista una retroalimentación entre lo ocurrido diariamente en la faena (costos, tonelajes extraídos, etc.) con lo esperado en el largo plazo.

### 2.2.3. Planificación minera estratégica

La estrategia consiste en definir el plan para alcanzar el objetivo de la compañía minera, identificando todos los escenarios posibles para lograr las metas establecidas. En el entorno minero, principalmente, este objetivo es maximizar el beneficio que se puede obtener de un recurso mineral (Kear, 2006). Por lo tanto, la planificación a largo plazo se define de acuerdo con los lineamientos estratégicos de la compañía y está realizada bajo incertidumbre al tomar supuestos que se cumplirán durante el horizonte a largo plazo (Parra, 2015).

La planificación estratégica tiene bases en la estimación de recursos, ya que es aquí donde se define el modelo de bloques que será optimizado y secuenciado. A partir de esto, existen restricciones geomecánicas que permiten la generación del *pit* final, tomando en cuenta ancho, altura y ángulos de talud. Al mismo tiempo, para encontrar los *pits* anidados, se debe realizar la valorización de cada uno de los bloques. Es por esto por lo que se trabaja con parámetros metalúrgicos, técnicos y económicos que permitan tener una buena estimación de lo que ocurre en la faena. Esta valorización de los bloques viene dada por la siguiente ecuación, donde  $P$  corresponde al precio,  $C_v$ ,  $C_m$  y  $C_p$ , son los costos de venta, minado y procesamiento, respectivamente,  $R$  es la recuperación;  $g$  corresponde a la ley y  $T$  el tonelaje presente en el bloque, mientras que  $F$  representa el factor de conversión entre toneladas y libras ( $1[t] = 2204.6[lb]$ ).

$$\text{Valorización} = (P - C_v) * F * R * g * T - (C_m + C_p) * T$$

Ecuación 2-4. Valorización de un bloque

Tomando en cuenta la valorización de los bloques, junto con restricciones geométricas y geomecánicas, se realiza la planificación estratégica de la manera tradicional, donde primero se aborda la problemática espacial de la definición del *pit* y luego se procede con el problema temporal de la generación de la secuencia de extracción. Según Goycoolea, Espinoza, Moreno y Rivera (2015), la metodología de planificación estratégica se divide en dos etapas, basándose en técnicas heurísticas. Lo primero es determinar el conjunto de fases que se utilizarán para el agendamiento. En segundo lugar, se secuencian los bloques (banco por banco) de cada *pushback*.

Una de las aproximaciones tradicionales del problema de la planificación estratégica minera, la entrega Gaupp (2008), el cual señala que en un comienzo son calculados los límites físicos del *pit* final y luego se obtiene una serie de *pushbacks* o fases, que permiten el secuenciamiento óptimo del plan. En un comienzo, se va aumentando gradualmente el precio del mineral, para encontrar qué bloques son extraídos en ese nivel de precios, permitiendo definir el primer *pit* anidado, como un conjunto de estos bloques. Luego se aumenta el factor del precio (*Revenue Factor*), para encontrar los bloques pertenecientes al segundo *pit* anidado, repitiendo este proceso hasta evaluar todos los bloques del modelo y encontrar el *pit* final. Esto es realizado a partir de la ejecución del algoritmo de Lerch & Grossmann (Lerch & Grossmann, 1965).

Posterior a esto, se escoge la estrategia para la extracción del mineral; para ello se define una serie de fases, las cuales son conjuntos de *pits* anidados continuos, estas son establecidas a partir de diversas consideraciones operacionales que permitan una correcta interacción entre las fases, lo cual permite elegir un secuenciamiento acorde a lo requerido. Entre las restricciones más comunes se encuentran anchos mínimos del fondo del *pit*, tasas de profundización, desfases mínimos y

máximos de bancos entre fases, anchos operacionales de cada fase, entre otras; con esto es posible encontrar el número y tamaño de las fases que maximice el beneficio del proyecto.

Finalmente, la secuencia de extracción se realiza escogiendo el mejor destino (botadero, *stockpile* o procesamiento) de cada uno de los bloques que integran las distintas fases. Esta elección se basa en la valorización realizada, diferenciando principalmente estéril de mineral y estableciendo la combinación óptima de mineral enviado a proceso o a los diferentes *stockpiles* para ser procesado a futuro.

#### 2.2.4. Elección de fases y secuenciamiento

Al obtener el conjunto de *pits* anidados, se puede determinar un secuenciamiento simplificado que entrega el *software* Whittle, para determinar los denominados *best* y *worst case*. Básicamente, se realiza un agendamiento preliminar a la elección de fases, donde el *best case* representa la extracción *pit a pit*, tomando en cuenta la secuencia ascendente del *revenue factor* (Figura 2-3. Izquierda). Esta regla genera altos retornos en un comienzo, pero la razón estéril mineral comienza a aumentar a través del tiempo. Habitualmente, este método es improbable de ejecutar, debido a las restricciones operacionales que conlleva: gran cantidad de bancos a extraer en un periodo, junto con no respetar los anchos mínimos establecidos para operativizar el proceso. El escenario *worst case* considera la extracción banco por banco (Figura 2-3. Derecha), por lo que este caso es aplicable concretamente, pero se debe contemplar que, al explotarse de esta manera, la tasa de extracción de estéril es muy alta en los primeros años por lo que no es un escenario muy utilizado para las empresas mineras, ya que no permite una buena optimización del valor generado.

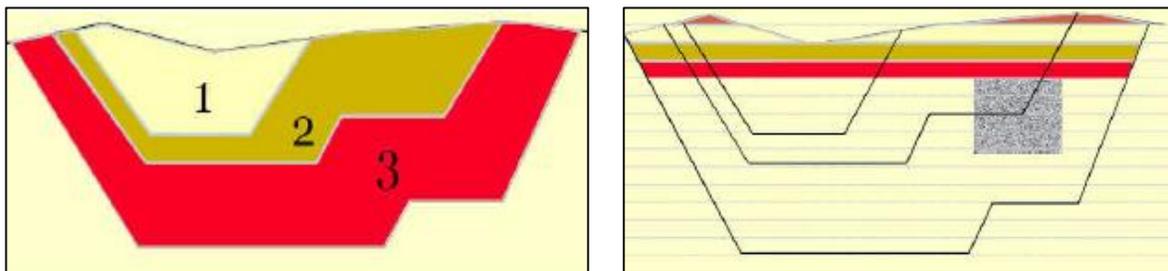


Figura 2-3. Tipos de extracción. Izquierda: *Best case*. Derecha: *Worst case*. FUEENTE: Troncoso, 2015

Como se menciona anteriormente, la elección de fases o *pushbacks* depende de diversos factores y restricciones, estos pueden ser definidos manualmente reconociendo un conjunto de restricciones más oportunas o se puede automatizar la selección de fases a través de los algoritmos de planificación de los diversos *softwares*; esta elección viene dada por resultados que incrementen el beneficio del depósito, principalmente considerando el VPN como factor clave en esta valorización, respetando las restricciones mencionadas anteriormente, siendo una combinación de bancos con los *pits* anidados.

#### 2.2.5. Algoritmos de secuenciamiento

En la industria minera existen diversos algoritmos que consiguen generar el secuenciamiento de las fases dentro del marco de la planificación, uno de los más destacados es el utilizado por Whittle: *Milawa*. Este algoritmo de planificación realiza el agendamiento a partir de unidades de fase-banco, reduciendo ampliamente el número de variables en comparación a una optimización por bloques. Existen dos tipos de este algoritmo, *Milawa NPV* y *Milawa Balanced*.

*Milawa NPV* pretende maximizar el VPN, para ello busca incrementar el beneficio a corto plazo, priorizando material de alta ley en los primeros años, donde no contempla el balance entre

procesamientos alternativos. Mientras que *Milawa Balanced* pretende controlar la extracción de mineral, fijándose en razones estéril mineral reguladas para la vida de la mina, por lo que preferencia el balance entre la explotación y el procesamiento de los minerales. Cabe mencionar que ambos tipos de secuenciamiento permiten el uso de *stockpiles*, pero no generan la optimización de estos, por lo que para el último caso queda restringida (en cierta medida) su aplicación al priorizar tasas de extracción constantes por periodos.

Otro algoritmo utilizado es el *Fixed Lead*, el cual fija el número de bancos en una fase, para poder pasar a la siguiente, permitiendo balancear la extracción de mineral y estéril. En este algoritmo son iguales todos los bancos que están activos.

## 2.2.6. Evaluación de los planes

La evaluación de un plan de producción minero viene dada por diversos indicadores de desempeño que permiten discernir entre todos los escenarios posibles. Principalmente se evalúa la secuencia de extracción que se llevará a cabo, considerando las restricciones mencionadas anteriormente, para establecer si es factible dicho escenario de planificación o es necesario realizar ciertos ajustes que logren mejorar o calibrar el plan.

Abdel Sabour & Dimitrakopoulos (2010), señalan que “la selección entre planes se basa en razones económicas. Esto se lleva a cabo evaluando cada uno de los posibles planes mineros” (p.191), por tanto, existe una componente económica y, además, otra operativa para evaluar la validez de un escenario. Para esto, se definen distintos indicadores, según criterios técnicos o económicos, los cuales consiguen discernir y comparar desde diferentes aristas los posibles planes mineros. A continuación, son descritos los indicadores más utilizados en la etapa de planificación y que son considerados para la evaluación de este trabajo.

### 2.2.6.1. Evaluación económica

- **VPN:** El valor presente neto o valor actual neto (VAN) determina la equivalencia en el tiempo  $t=0$  de los flujos futuros efectivos de un proyecto, descontando la inversión inicial de este mismo. Así, es recomendable aceptar un proyecto cuando esta definición sea mayor a cero (Astudillo, 2012). Entonces, el VPN queda determinado por:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=0}^T \frac{S_t}{(1+r)^t}$$

Ecuación 2-5. Valor Presente Neto

Donde  $S_0$  representa la inversión inicial,  $S_t$  corresponde al flujo neto efectivo en el periodo  $t$  y  $r$  es la tasa de descuento.

- **TIR:** La tasa interna de retorno o TIR es la tasa de interés  $r$  que hace que el valor presente neto es cero. Por lo tanto, representa la rentabilidad de un proyecto y es aceptable cuando  $TIR > 0$ . Entonces se cumple que:

$$\sum_{t=0}^T \frac{S_t}{(1+r^*)^t} = VPN$$

Ecuación 2-6. Tasa interna de retorno

- **Payback:** es el plazo de recuperación del capital empleado, o sea es la cantidad de periodos que se tarda en recuperar la inversión realizada. Esta se compara con los flujos de caja de cada periodo.
- **IVAN:** corresponde a la razón entre el VPN y la inversión.

$$IIVAN = \frac{VAN}{S_0}$$

Ecuación 2-7. IVAN

### 2.2.6.2. Evaluación técnica-operativa

- **SR o REM (*Stripping ratio o razón estéril mineral*):** Es la relación entre la cantidad de estéril y mineral (enviado a proceso o *stockpile*) extraído. La razón se mide en intervalos de tiempo definidos para poder ser comparables, una alta tasa de estéril-mineral conlleva un mayor costo por unidad de mineral extraído. Además, se privilegia tener un *stripping ratio* poco variable durante la vida de la mina, así los costos son equiparables.
- **LOM (*life of mine*):** Es la vida útil de la faena, considera la duración desde el comienzo de la explotación, sirve para estimar proyecciones de cuanto puede extenderse la extracción del mineral y los beneficios/perjuicios de esto.
- **Rendimiento:** Corresponde a la cantidad de fino producido en periodos de tiempo, permite contemplar diversas relaciones en las distintas etapas de la explotación de una faena.
- **Tamaño *pit* final:** Es el tamaño y forma de la envolvente económica seleccionada, en específico, se realizan comparaciones entre el estéril y mineral que puede contener los diversos *pits* generados.

## 2.3. Definición de criterios utilizados en planificación estratégica

La planificación depende de diversos parámetros que provienen de distintas fuentes de información. Por ejemplo, el modelo de bloques procede de la geoestadística; las restricciones geométricas del *pit* son datos obtenidos de la geomecánica, la valorización de un bloque proviene tanto de datos metalúrgicos como de la incertidumbre de mercado. Es por esto, que la planificación es una etapa decisiva para cuantificar el beneficio que se obtendrá del proyecto, considerando una gran cantidad de aspectos.

Existen diversas etapas dentro del proceso minero, donde las variables que definen a cada una de estas provienen de distintas estimaciones y fuentes de información; esta divergencia de orígenes y etapas provoca que los proyectos mineros no siempre cumplan con plazos y utilidades estipuladas en etapas tempranas. McCarthy (2003), realiza un estudio en diversas faenas y señala que los problemas existentes en la puesta en marcha de los proyectos mineros provienen de errores y malas estimaciones en la etapa de factibilidad. Sumado a esto, el autor define que las áreas con mayores problemas que repercuten finalmente en los resultados de un proyecto son la estimación de recursos y análisis geoestadístico (17%), geotecnia (9%), pruebas metalúrgicas (15%), diseño y planificación mina (32%).

Como se menciona en el párrafo anterior, la planificación abarca cerca de un tercio del total de los factores que generan error en la minería, pero es fundamental mencionar que desviaciones en las áreas indicadas anteriormente repercuten directa o indirectamente en la planificación estratégica minera.

Es por esto que, para este estudio se definen cuatro grandes criterios que son utilizados en la planificación estratégica, dentro de los cuales se encuentra la estimación y clasificación de recursos, geomecánica, modelo metalúrgico y parámetros técnico-económicos que definen el secuenciamiento y estrategia de planificación.

### 2.3.1. Geomecánica

#### 2.3.1.1. Definición de ángulo global y número de bancos utilizados

Hall (2009), señala que la elección del ángulo de talud puede tener efectos drásticos en el tonelaje que se explotará y en la razón estéril/mineral al modificar la creación del *pit*. Esto principalmente, debido a que las variables geotécnicas permiten cuantificar las reservas existentes dentro del *pit* final, al establecer las restricciones para la forma y tamaño que tendrá este.

Durante la etapa de planificación estratégica, se deben asumir características del diseño que aún no se construyen y que pueden sufrir modificaciones. Tal es el caso de la ubicación de la rampa, ya que la pendiente global del *pit* debe abarcar el paso de esta, que será diseñada con posterioridad. Para ello, se utilizan simples reglas que dependen del planificador y que permiten estimar cada cuantos bancos pasará la rampa en puntos específicos, es por esto que el programa Whittle dispone de un ángulo promedio (ángulo inter rampa) que contempla la presencia de la rampa. Este es un parámetro de entrada que ayuda a encontrar el *pit* final, donde al igual que otras variables, es ingresado bajo un criterio establecido y en un principio, no conlleva a mayor análisis su elección.

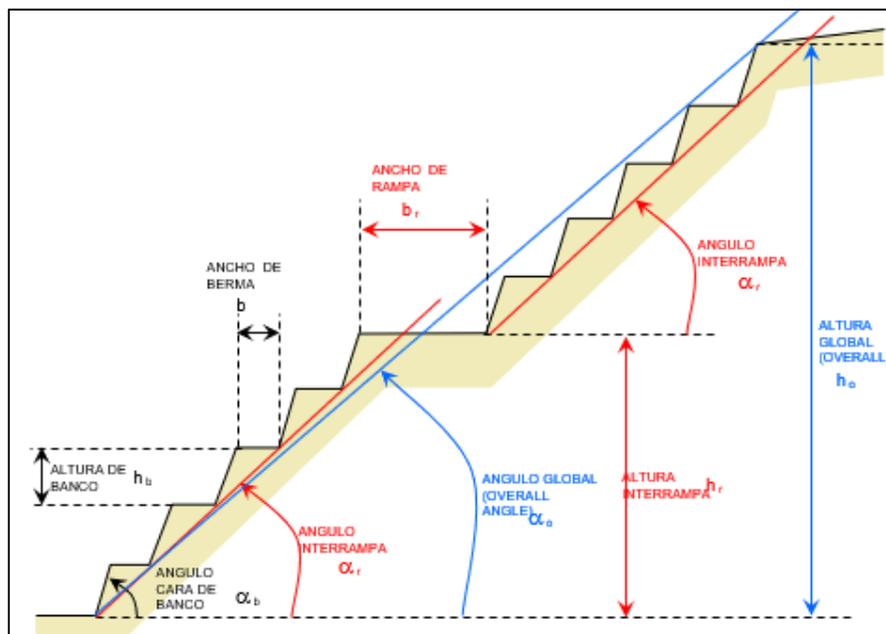


Figura 2-4. Esquema global del *pit*. FUENTE: Troncoso, 2015

Mencionado lo anterior, se debe sugerir que no necesariamente se respetará el ángulo utilizado, en el diseño minero, el cual puede variar en ciertos grados. Lo mismo ocurre en la cantidad de bancos que se toma en cuenta en la generación del *pit*, sumado a que este parámetro muchas veces es obviado o forjado a partir de cierto criterio de expertos, pero ¿realmente se respeta a cabalidad lo que se establece en la geomecánica en toda la mina durante la planificación?

Sin entrar en mayor énfasis en los aspectos técnicos de la geotecnia, el ángulo generado está dado a partir de un Factor de Seguridad (FS), el cual se define a partir de criterios de aceptabilidad y es

una relación entre las fuerzas resistentes y fuerzas solicitantes presentes en el talud (Parra, 2015). El valor crítico de este factor es causado por diversas reglas; dependiendo del juicio de expertos, el método de evaluación, confiabilidad de datos, condiciones internas y externas, etc.; otro aspecto relevante es considerar que tan conservador se definen los parámetros que guardan directa relación con el FS, tales como los ángulos del *pit* y altura de talud.

Como se menciona anteriormente, la planificación estratégica se lleva a cabo contemplando aspectos prematuros del diseño de mina, por lo que no representa totalmente la realidad de la explotación de la faena. Según Hall (2009), la estrategia de planificación aplicada tradicionalmente consiste en reimportar al programa el diseño cuando ya se han establecido las rampas; esto con el fin de comparar las transformaciones del *pit*, estableciendo si se han realizado representaciones acordes a lo esperado. Este proceso tiende a ser iterativo para comprobar que el VPN del diseño final es similar al utilizado en la planificación estratégica.

## **2.3.2. Metalurgia**

### **2.3.2.1. Recuperación metalúrgica**

Como señalan Carrasco et al. (2008), la recuperación metalúrgica es parte importante en la evaluación económica en el negocio minero, al impactar directamente en la valorización de los bloques del modelo. Además, los autores sostienen que “la recuperación es una cantidad no aditiva, por lo que es difícil modelar su variabilidad espacial y realizar una correcta estimación del comportamiento de la recuperación” (p.1). Por lo tanto, es un parámetro crítico dentro de la planificación estratégica, ya que está presente en la valoración que permiten discernir qué plan se debe escoger, afectando el beneficio asociado a los bloques. En la etapa de planificación estratégica, la recuperación es considerada constante y es tomada a partir de la curva generada por pruebas piloto, por lo que no necesariamente representa lo que se recupera de forma efectiva en todos los periodos de tiempo de la vida útil de la faena.

### **2.3.2.2. Ley de corte**

Más conocida es la influencia de la ley de corte dentro de las diversas etapas de planificación, siendo una variable que se estudia rigurosamente, para obtener la mejor ganancia económica. En efecto, Hall (2003), señala que los tres parámetros principales donde una empresa puede tomar decisiones independientes son el método de extracción, la tasa de producción y la ley de corte, donde recalca que esta última es el factor más importante, debido a que el método de explotación y la tasa de producción pueden ser alterados significativamente dependiendo de la ley de corte.

McCarthy (2010), en una revisión del estudio realizado por Hall (2003), señala que la sensibilidad del beneficio obtenido de un proyecto, a partir de la tasa de producción y ley de corte, forma una “Superficie de Valor” o “*Hill of Value*” al encontrar diversas combinaciones de estos. Además, para cada combinación es necesario estimar costos, capacidad de mina, entre otros, para poder evaluar el resultado financiero, con esto es posible evaluar la forma de la superficie e identificar el óptimo, según la variación de estos parámetros. En la Figura 2-5 se muestra el *Hill of Value*, generado a partir de lo mencionado por McCarthy.

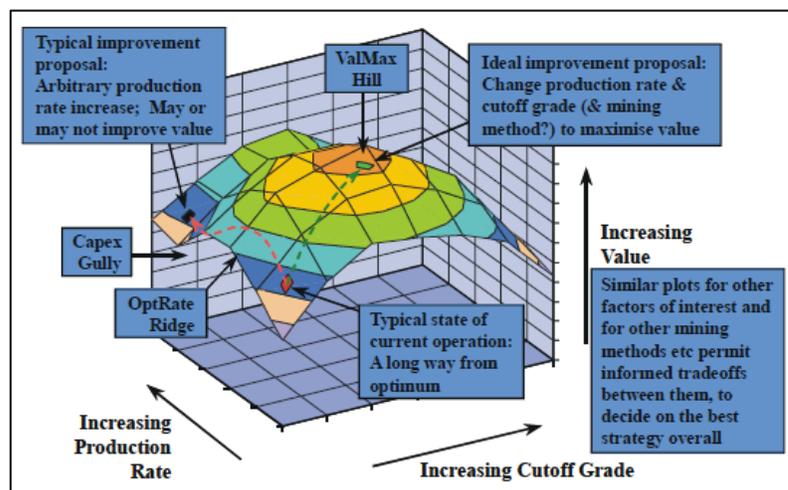


Figura 2-5. Hill of Value. FUENTE: McCarthy, 2003

La ley de corte marginal corresponde a la ley mínima que genera un beneficio económico marginal, donde existe un equilibrio entre los costos y los ingresos. Es posible definirla matemáticamente despejando la ley en la Ecuación 2-4, considerando la valorización económica como nula.

Es posible encontrar leyes de corte mayores a la ley de corte marginal que permiten generar mayor valor, esto dado principalmente a que es posible discernir económicamente entre llevar a proceso los bloques que se encuentren bajo esta ley o dejarlos en pilas de *stock*, ya que puede generar mayor beneficio dejar en acopio estos bloques para tratarlos en un futuro.

### 2.3.3. Parámetros técnico-económicos

Los parámetros técnicos-económicos son utilizados para la definición del *pit* final, selección de fases y el secuenciamiento de la explotación. Las variables impactan de distinta manera dentro de la planificación, ya que pueden afectar tanto la valorización del bloque como en la cantidad de mineral a extraer en un periodo de tiempo definido. De esta manera, los parámetros que más influyen en la planificación son la escala de producción (capacidad de mina y planta), CAPEX, precios y costos. Estos últimos son tomados como exógenos, ya que dependen directa (precio del metal) o indirectamente (costos de mina, planta, ventas, etc.) de la incertidumbre de mercado.

#### 2.3.3.1. Escalas de producción

La capacidad de minado y de procesamiento están determinadas a partir de criterios simples empleados en etapas tempranas, que no conllevan mayor análisis para estimar cual es la mejor combinación de estas capacidades que genere un mayor beneficio del proyecto. Como se menciona antes, McCarthy (2010) muestra que típicamente las propuestas de mejoras de un proyecto consisten en aumentar las tasas de extracción y/o producción, pero no necesariamente incrementan el valor de un proyecto. Específicamente el autor señala que, en proyectos de corta vida, elevar estas tasas acrecienta el riesgo de producir mucho en tiempos de baja del precio del metal. Además, las capacidades de planta y minado son esenciales en la determinación de la inversión necesaria del proyecto, por lo que poseen un doble efecto en los resultados de un plan estratégico. Junto con la ley de corte, estas también son consideradas para el diseño de mina, por lo que determinan la escala de producción de la faena.

El uso de *stockpiles* permite alargar la vida de la mina al tener almacenado mineral que en un comienzo no entra a proceso, por lo tanto es una variable que ofrece controlar o maximizar la tasa

de extracción del mineral, al interactuar directamente con esta, permitiendo enviar mayor cantidad de mineral para procesar y mantener un acopio que genere un mayor aprovechamiento al controlar de mejor manera la ley que entra a proceso, esto debido a que se puede discernir entre mandar directamente a proceso o a un acopio, los bloques económicamente rentables. Por lo que ocupar el material de *stockpiles* expande el potencial beneficio económico y la vida de la mina.

### 2.3.3.2. CAPEX

La inversión utilizada corresponde al capital inicial necesario para poder llevar a cabo el desarrollo de toda la faena minera, bajo este contexto, la inversión o CAPEX (*Capital Expenditures*) invertida, es posible dividirla en CAPEX mina, el cual concierne al movimiento inicial de tierra o *pre-stripping*, sumado a la infraestructura, equipos mineros, entre otros; mientras que el CAPEX planta corresponde a la envergadura de los equipos e infraestructura de la planta de procesamiento.

### 2.3.3.3. Costos

Con respecto a los costos, se puede tener mayor control en este ámbito, tal es el caso de CODELCO y su política de reducción de costos implementada a través de los años, donde destaca el “Plan de Reducción de Costos de 2015” donde se informó que se logró rebajar costos C1 en al menos un 11% en comparación con el año anterior. Entonces, es necesario tener consideraciones de las posibles variaciones de los distintos costos en la etapa de planificación estratégica y observar la incidencia de estos parámetros en los resultados, estableciendo si realmente impacta en gran medida en esta etapa.

### 2.3.3.4. Precio del cobre

Diversos son los análisis para entender el comportamiento del precio de los metales a largo plazo, para ello se utilizan diferentes modelos para realizar la estimación del precio del metal en cuestión. Por ejemplo, Tapia (2015) establece que existen modelos estocásticos, basados en el comportamiento histórico y modelos tipo árbol binomial que permiten estimar de manera correcta el precio del metal. Además, Engel y Valdés (2001) señalan que un modelo autorregresivo de primer orden es el más adecuado para predecir el precio del cobre en horizontes de 2 a 5 años, pero no se adecúa para un horizonte a largo plazo.

Cochilco, en su último informe de mercado presentado el año 2017 (Informe Tendencias de mercado del cobre, tercer trimestre 2017) elevó su estimación del precio del cobre a 2.77 [US\$/lb] y a 2.95 [US\$/lb] para los años 2017 y 2018, respectivamente. Contrastando lo presentado por el mismo organismo en su informe para el segundo trimestre del año 2017 (Informe Tendencias de mercado del cobre, segundo trimestre 2017), donde situaba el precio del metal en 2.64 [US\$/lb] (2017) y 2.68 [US\$/lb] (2018). Como se observa, la discrepancia de las proyecciones es notoria, incluso cuando la diferencia de tiempo es corta entre la generación de un informe y otro (de la misma entidad). Esto se debe a que la volatilidad del precio del metal depende de diversos factores externos e internos, tales como oferta y demanda, materiales sustitutos, políticas mundiales, nivel de inversión, etc.

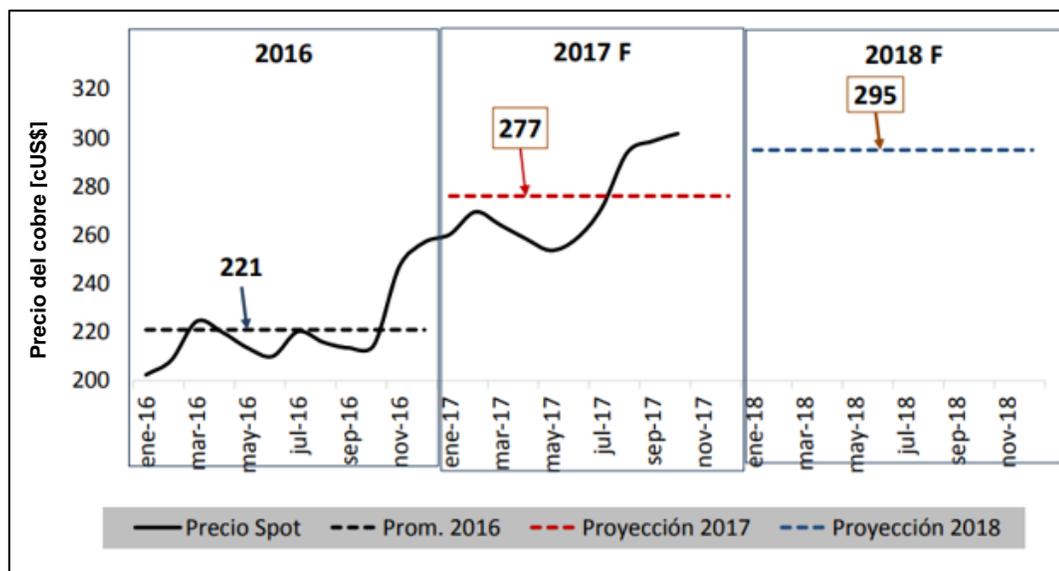


Figura 2-6. Proyección precio del cobre. FUENTE: Cochilco (2017a)

## 2.4. Diseño robusto

Según Gutiérrez y de la Vara (2008), el diseño robusto surge a partir de las ideas y métodos de ingeniería de la calidad del ingeniero japonés Taguchi. Los autores establecen que la robustez viene dada por la insensibilidad o resistencia de los procesos y productos ante el medio en el que se aborda. Por lo que en un diseño robusto “se trata de lograr que el producto/proceso tenga el desempeño deseado sin que le afecten las fuentes de variación no controladas” (p.298), estas fuentes son conocidas como ruidos, los cuales son tratados de minimizar para encontrar una combinación controlable que disminuya el efecto de estos en el resultado final.

Además, la “calidad de un producto” debe ser medida para minimizar las pérdidas que este trae consigo. Bajo esta primicia, se plantea un enfoque dirigido más al cliente o sociedad que al propio fabricante, desarrollando la idea que el control de calidad no es suficiente para encontrar una calidad que sea competitiva, junto con esto, los autores señalan que:

“El objetivo del diseño robusto de parámetros es lograr productos y procesos robustos frente a las causas de la variabilidad (ruidos), que hacen que las características funcionales de los productos se desvíen de sus valores óptimos provocando costos de calidad” (p. 296).

El diseño robusto incluye la variabilidad a la que están sometidos los procesos cuando son afectados los parámetros con los que están definidos. Bajo esto, el diseño robusto tiene presente el efecto de un factor sobre la media y la variación de la característica de calidad que presenta el producto que se mide. La Figura 2-7 presenta cuatro tipos de factores que influyen en la calidad de un producto: la clase I afecta a la media y variabilidad, clase II sólo esta última, clase III afecta sólo la media y la clase IV no afecta ninguna de las dos. Donde el eje horizontal representa efectos sobre la media y el eje vertical sobre la variabilidad.

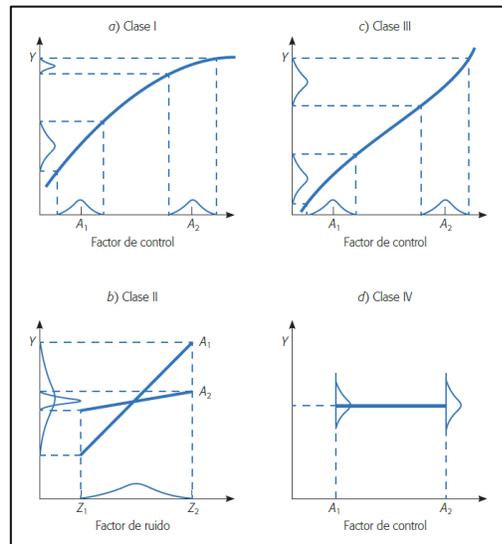


Figura 2-7. Diseño Robusto. FUENTE: Gutiérrez y De la Vara, 2015

Además, Taguchi propone un estadístico del desempeño, llamado “razón señal/ruido (S/R)” la cual se calcula entre cada factor controlable y variables de respuesta a analizar, con esto se tiene que la robustez está determinada por aquella combinación que maximice el estadístico S/R.

La Figura 2-8 muestra un ejemplo de cómo evaluar el nivel de incidencia de diversos factores en alguna variable de salida determinada, con esto es posible cuantificar y comprender los parámetros que definen la planificación estratégica.

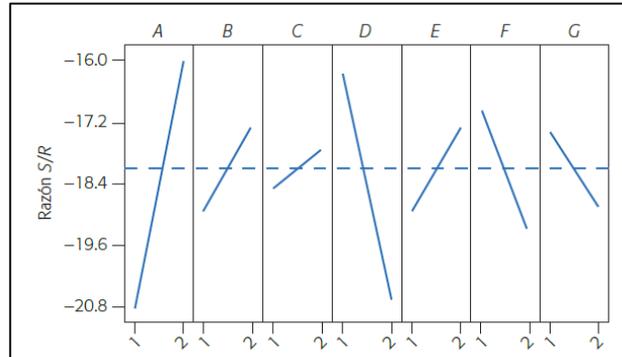


Figura 2-8. Razón Señal Ruido. FUENTE: Gutiérrez y De la Vara, 2015

## 2.5. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos radica en determinar que experimentos o pruebas deben realizarse para obtener datos que proporcionen alternativas y permitan resolver problemas o lograr mejoras en distintos tipos de procesos, esto es fundamentado bajo análisis estadísticos que admiten realizar las comparaciones entre los factores (Gutiérrez y De la Vara, 2018). Dentro del flujo de trabajo del diseño de experimentos, la opción *full factorial* permite generar todos los escenarios posibles, considerando la totalidad de combinaciones de las variables de ruido escogidas y sus respectivos rangos de valores. Entonces, si existen las de tipo a, b y c, con 2, 2 y 3 valores posibles respectivamente, se crean  $2 \times 2 \times 3 = 12$  escenarios posibles (Tabla 2-1). Ahora, si aumenta el número de variables a 4, tomando en cuenta 3 valores cada uno, se tiene un total de  $4^3$  escenarios totales.

Tabla 2-1. Escenarios en Diseño de Experimentos

Escenarios	Variable a	Variable b	Variable c
Escenario #1	1	1	1
Escenario #2	1	1	2
Escenario #3	1	1	3
Escenario #4	1	2	1
Escenario #5	1	2	2
Escenario #6	1	2	3
Escenario #7	2	1	1
Escenario #8	2	1	2
Escenario #9	2	1	3
Escenario #10	2	2	1
Escenario #11	2	2	2
Escenario #12	2	2	3

## 2.6. Programas utilizados

**GEOVIA Surpac:** Es una herramienta computacional que permite realizar estudios desde el modelamiento geológico hasta el diseño de una operación minera. El flujo de trabajo logra realizar una correcta estimación y clasificación de los recursos, permitiendo cuantificar reservas y recursos mineros con diversas herramientas geoestadísticas; además, conversa en gran medida con los otros dos programas utilizados.

**GEOVIA Whittle:** Es un programa computacional con el cual se puede desarrollar la planificación estratégica de minas a cielo abierto y determinar la viabilidad financiera del proyecto, integrando un gran número de variables y la mayor cantidad de consideraciones posibles, tiene distintos tipos de algoritmos para llevar a cabo el agendamiento del plan de producción (*Milawa NPV*, *Balanced*, *Fixed Lead*), además de poder optimizar dicho plan según leyes de corte, uso de *stock*, de mezclas o incluyendo todas los parámetros anteriores a través de *Simultaneous Optimization*.

**SIMULIA Isight:** Es un automatizador y optimizador de alternativas de diseño, creando simulaciones de flujos de procesos que permite integrar infinidad de herramientas y variables que generen múltiples escenarios para buscar rendimientos óptimos. Su interfaz es compatible con diversos programas como Excel, Surpac, Whittle, etc. Con los cuales es posible realizar diversos análisis tales como Diseño de experimentos, Monte Carlo, Six Sigma, etc.

### 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología se separa en dos etapas, la primera se centra en la estimación de los recursos para generar los modelos de bloques y la segunda corresponde a la planificación estratégica de estos modelos estimados. Además, se debe tener noción de todas las variables que están presentes en la etapa de evaluación y planificación de un proyecto minero. Junto con esto, es de suma importancia establecer los rangos de variabilidad de los parámetros escogidos para poder realizar una correcta implementación de lo descrito posteriormente. Los rangos de estudio deben ser acordes a lo que se espera de un proyecto minero, para comprender las reales incidencias de estas.

#### 3.1. Estimación de leyes

1. El proceso de estimación comienza encontrando el mapa variográfico que define la orientación espacial de las leyes del mineral en el yacimiento, para posteriormente poder encontrar el variograma experimental, determinando la existencia de anisotropía en el depósito. La etapa de variografía termina encontrando el variograma modelado que establece de manera óptima la distribución espacial de las leyes. La creación de este depende de diversos parámetros que permiten modelar correctamente el depósito. En el estudio realizado, se propone evaluar el impacto del **efecto pepita** y del **alcance** de este, por lo que los valores encontrados de estas variables quedan definidos para el caso base.
2. Tomando en cuenta el variograma modelado, se procede a la estimación de recursos a través de *kriging* ordinario, en esta etapa el **número máximo y mínimo de muestras** a considerar también es un factor que es relevante a la hora de la estimación.  
Para efectos de simplificación del problema, es que se utiliza un solo dominio para realizar la estimación, permitiendo definir el depósito como una sola unidad. Mencionado esto, se toma en cuenta la clasificación de los recursos, donde no se generan cambios en la formulación de este criterio, para poder aminorar los tiempos de evaluación en todos los escenarios.
3. Determinada la estimación de leyes se crea el modelo de bloques con todos los atributos y es exportado en formato *.mod* (compatible con Whittle), para seguir una línea de trabajo que permita realizar una correcta planificación de los modelos establecidos. Cabe mencionar que el proceso de estimación es realizado para el mineral de cobre, el resto de los minerales que pueden estar presentes en los depósitos ya están estimados y no presentan variaciones con la metodología.
4. Se realiza un análisis exploratorio de los datos, para establecer que el modelo de bloques no presente irregularidades y/o problemas que no permitan la correcta evaluación del depósito, además permite tener la noción de cómo realizar una planificación básica del caso base del yacimiento, tomando en cuenta la distribución de leyes, tamaño del depósito, tonelaje, leyes promedio, etc. Establecido este análisis, se realiza la planificación estratégica del modelo estimado; esta se efectúa con parámetros geomecánicos, metalúrgicos, técnicos, operativos y económicos determinados con anterioridad, para obtener el caso base de la planificación y poder realizar la sensibilización de las diversas medidas.
5. El proceso general de estimación es realizado en Surpac, donde se almacenan todos los pasos en una macro de dicho programa; con esto es posible automatizar el proceso

ingresando la macro a Isight, optimizando el trabajo de estimación, acortando los tiempos de trabajo, accediendo a que este sea posible de realizar junto a las múltiples variaciones.

6. En Isight, se realiza un “Diseño de experimentos” (DOE), considerando los parámetros de la macro que serán sensibilizadas. Para ello se definen los rangos que entran en la valoración para efectuar dicha estimación. Es necesario recalcar que la metodología pretende evaluar, a partir de un caso base, la incidencia e interdependencia de las diversas alteraciones de los parámetros en estudio dentro de la planificación, es por esto, que los resultados de las variaciones no necesariamente representan la mejor estimación de los depósitos. Esto produce diversos escenarios con la totalidad de combinaciones posibles tomando en cuenta los rangos de las variables seleccionadas. El diseño de experimentos permite realizar el proceso con los parámetros de entrada seleccionados, tomando todas las posibles configuraciones de estas. Isight admite la iteración de la macro considerando todas las disposiciones, encontrando un modelo de bloques estimado para cada una de ellas. Con esto, es posible generar un plan de producción para cada disposición en el programa Whittle, siguiendo los pasos mencionados a continuación.

Son sensibilizados los tres parámetros mencionados (efecto pepa, alcance y número máximo de muestras), para lo cual se escoge un caso base y se aplica una variación de -20% y 20% para cada uno, con esto se obtienen de  $3^3$  casos de estimación de recursos considerando todas las combinaciones posibles de los parámetros. En la Tabla 3-1 se muestran las configuraciones realizadas, donde los signos – y + denota la sensibilizaciones negativas y positivas respectivamente, mientras que el signo o, representa el valor base a utilizar de cada parámetro.

**Tabla 3-1. Escenarios de estimación**

<b>Escenarios</b>	<b>Alcance</b>	<b>Efecto pepita</b>	<b># máximo de muestras</b>
<b>Escenario #1</b>	–	–	–
<b>Escenario #2</b>	–	–	o
<b>Escenario #3</b>	–	–	+
<b>Escenario #4</b>	–	o	–
<b>Escenario #5</b>	–	o	o
<b>Escenario #6</b>	–	o	+
<b>Escenario #7</b>	–	+	–
<b>Escenario #8</b>	–	+	o
<b>Escenario #9</b>	–	+	+
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
<b>Escenario #27</b>	+	+	+

## 3.2. Planificación estratégica

A partir de los modelos de bloques obtenidos desde Surpac-Isight, se desarrolla el caso base en el *software* Whittle, para el cual son definidos los parámetros geomecánicos, metalúrgicos, operativos y económicos que permiten la creación del plan de producción base. Comenzando con las variaciones de los seleccionados en el estudio, se generan múltiples escenarios de producción para la posterior evaluación de estos, según los indicadores más relevantes en cada caso.

### 3.2.1. Definición de variables

Dada la configuración del caso base, se establecen cuáles son las variables que pueden ser sensibilizadas en la etapa de planificación estratégica.

- Ángulo global de evaluación
- Número de bancos considerados para el ángulo
- Recuperación
- Ley de corte
- Precio
- Costo mina
- Costo planta
- Capacidad minado
- Capacidad procesamiento

### 3.2.2. Generación de *Pit Shells*

El primer paso del proceso de planificación comprende la definición de los límites espaciales del *pit* a partir de las restricciones geomecánicas. Los parámetros que serán variados son el **ángulo de evaluación** y el **número de bancos**. Posterior a esto, se generan los *pit shells* o *pits* anidados, para ello, se realizan modificaciones en los valores de **recuperación, ley de corte, costo mina, costo planta y precio del mineral**.

Con estos resultados, se escoge la primera fase, tomando en cuenta un conjunto de *pits* anidados que permitan mantener una alimentación a planta durante al menos tres años. Además, se procede a la elección del *pit* final operativo; esto es establecido mediante un algoritmo que determine hasta donde será explotado el depósito, para obtener un mejor beneficio económico. Esto se realiza considerando como último *pit* anidado, el que posea una diferencia menor de tonelaje con el *pit* a *Revenue Factor* 1, principalmente se debe a que el óptimo no es causado explotando todo el mineral o esta ganancia es muy marginal para ser estimado dentro de la planificación estratégica.

La creación de *pits* anidados viene dada por el estudio realizado por Poblete et al. (2016b), en el cual son generados a partir de un punto inicial de búsqueda dentro del modelo y una dirección preferencial de minado, lo que permite encontrar fases más operativas e incrementa el beneficio económico

Cabe mencionar que la ley de corte utilizada para la etapa de planificación corresponde a una restricción de mineral a entrada a proceso, esto consiste en establecer un límite inferior del mineral que es posible enviar a la planta de procesamiento correctamente, durante todo el tiempo de explotación de la faena. Por lo tanto, la ley de corte empleada para implementar la metodología debe ser similar o superior a la ley de corte marginal establecida, debido a que esto permite mejorar cuantiosamente el beneficio económico, ya que el mineral que se encuentra entre la ley de entrada

a proceso y la ley de corte marginal es enviado a *stock* para poder ser aprovechado en otro periodo de tiempo.

### 3.2.3. Estimación del CAPEX

La estimación de la inversión (CAPEX) depende de los parámetros de diseño utilizados. Entonces, depende de la tasa de procesamiento que requiere la faena, esto principalmente a que se estima la inversión de la infraestructura y equipos de la planta a partir de lo que se procesa anualmente. La segunda componente de la inversión requerida depende de la infraestructura, equipos mineros y otros, además del movimiento de tierra o *pre-stripping*, por lo tanto, deriva de la tasa de extracción que se ocupa en la faena.

Para estimar el CAPEX a partir de los parámetros mencionados, se ajusta una regresión realizada desde los datos obtenidos de Cochilco (Cochilco, 2015) en su informe “Inversión en la minería chilena – Cartera de proyectos 2015-2024”. De estos datos se obtiene una función dependiente de la tasa de producción, considerando faenas de la mediana y gran minería cuyo proceso de tratamiento de mineral sean plantas concentradoras. Además, se realiza un *benchmark*, para realizar un ajuste a la función, asociado a la tasa de extracción del mineral (Miranda, 2017). Así, se obtiene la ecuación (1), dependiente de los dos factores mencionados, la cual es un adaptado de lo realizado por Miranda (2017), donde  $C_P$  representa la tasa de procesamiento y  $C_M$  corresponde a la tasa de extracción (ambas expresiones están determinadas en [Mt/año]).

$$CAPEX [MUS\$] = 0.0008C_P^4 - 0.14C_P^3 + 7.88C_P^2 - 65.41C_P + 658.76 + 4.6C_M$$

Ecuación 3-1. Estimación del CAPEX

En la Figura 3-1 se aprecia la regresión utilizada para la inversión correspondiente a la tasa de procesamiento, esto se debe principalmente a que variaciones en la tasa de procesamiento de mineral impacta directamente en la magnitud del proyecto, incluso en mayor medida que la capacidad de minado que posea la faena. Cabe mencionar que la regresión es realizada entre los 7 a 70 millones de toneladas procesadas anualmente, por lo que los casos de estudio deben estar dentro de estos rangos para hacer factible esta ecuación determinante de la inversión.

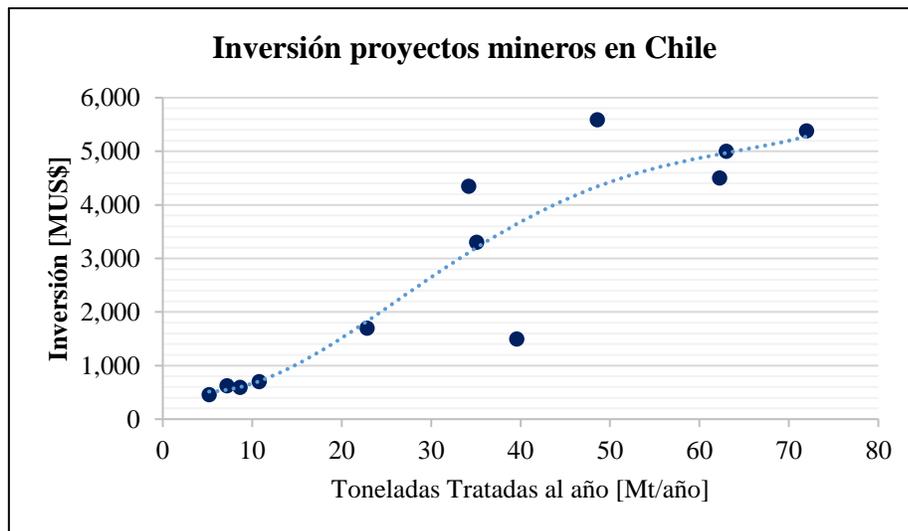


Figura 3-1. Inversión estimada a partir de mineral tratado anualmente. FUENTE: Adaptado de Miranda, 2017

### 3.2.4. Secuenciamiento

Tomando en cuenta la elección de la primera fase y el límite del *pit* final, se escoge la serie de fases para optimizar el plan. Bajo restricciones operacionales ya mencionadas, se llega a un número determinado de fases y el tamaño de estas, que permitan encontrar un correcto secuenciamiento y se pueda optimizar el plan.

A continuación, se genera el escenario operacional para llevar a cabo dicho secuenciamiento a través del algoritmo *Milawa NPV*. Los parámetros que son variados en esta etapa es **recuperación, ley de corte, costo mina, costo planta, precio del mineral, capacidad planta y capacidad minado**. El CAPEX calculado anteriormente es utilizado en esta etapa, para definir el escenario.

Además, se hace necesario el beneficio entregado por los *stockpiles*, debido a que permite una mejor comparación entre los planes, ya que, al transformar la tasa de extracción, puede generar grandes cambios en los resultados, que no necesariamente serán comparables. Lo mismo ocurre al someter a variaciones la ley de corte: sin el uso de *stock*, lo que está bajo esta ley no entrará a proceso, por lo que no representa un resultado correcto al realizar la sensibilidad del parámetro ley de corte.

En esta etapa se tiene la variación de los nueve parámetros mencionados, a los cuales se le aplican sensibilizaciones positivas y negativas, obteniendo tres valores para cada parámetro, con esto es posible alcanzar 3<sup>9</sup> escenarios de planificación, lo que se traduce en 19,683 planes de producción a partir de un modelo de bloques generado en la etapa anterior. La Tabla 3-2 muestra una sección de la combinación de variables para poder generar la totalidad de escenarios para cada modelo de bloques (los signos son los mismos utilizados en la Tabla 3-1). A su vez, la Figura 3-2 muestra el flujo de trabajo desarrollado en Isight, considerando las etapas donde son aplicados los parámetros (estimación y planificación) y donde se realizan las iteraciones.

Tabla 3-2. Escenarios de planificación

Escenarios	Ángulo global	# bancos	Rec.	Ley de corte	Precio	Costo mina	Costo planta	Cap mina	Cap planta
Escenario #1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Escenario #2	—	—	—	—	—	—	—	—	0
Escenario #3	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Escenario #4	—	—	—	—	—	—	—	0	—
Escenario #5	—	—	—	—	—	—	—	0	0
Escenario #6	—	—	—	—	—	—	—	0	+
Escenario #7	—	—	—	—	—	—	—	+	—
Escenario #8	—	—	—	—	—	—	—	+	0
Escenario #9	—	—	—	—	—	—	—	+	+
Escenario #10	—	—	—	—	—	—	0	—	—
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Escenario #19,681	+	+	+	+	+	+	+	+	—
Escenario #19,682	+	+	+	+	+	+	+	+	0
Escenario #19,683	+	+	+	+	+	+	+	+	+

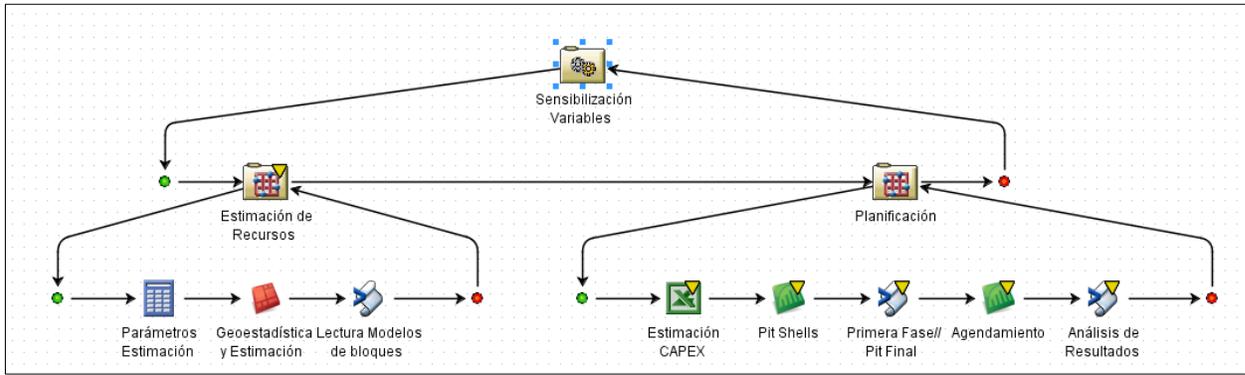


Figura 3-2. Flujo de trabajo en Isight

### 3.3. Evaluación de las estrategias

La evaluación de los distintos escenarios de planificación se debe realizar según condiciones económicas (VPN, *payback*, TIR, IVAN) y técnicas-operativas (LOM, *stripping ratio*, cantidad de fino por periodo, cobre recuperado, tamaño y forma del *pit*). La automatización realizada en Isight permite la comparación de planes según todos los indicadores mencionados. La Tabla 3-3 muestra una sección de los escenarios corridos en la etapa de planificación, donde se encuentran los principales resultados a abordar.

Tabla 3-3. Extracto de tabla utilizada en la planificación

Ángulo	# bancos	Rec [%]	Ley de corte [%]	Precio [US\$/lb]	Costo mina [US\$/t]	Costo planta [US\$/t]	Cap Mina [Mt/año]	Cap Planta [Mt/año]	Ton [t]	LOM [años]	SR	<i>Payback</i> [años]	TIR [%]	VPN [MUSS]
46°	8	0.91	0.54	2.58	1.8	10.5	63	19.8	3191	56.1	1.9	7.89	12.9	798.3
46°	8	0.87	0.54	2.72	1.8	10.5	63	19.8	3192	56	1.9	7.6	13.1	828.9
46°	8	0.89	0.54	2.72	1.8	10.5	63	19.8	3346	58.43	1.9	7.33	13.4	914.8

La evaluación de los indicadores accede a establecer las distintas incidencias de los parámetros en los resultados de un plan, así como la interdependencia de estos. La apreciación de los resultados dispone una cuantificación del impacto de los criterios en los distintos niveles de la evaluación de un proyecto minero.

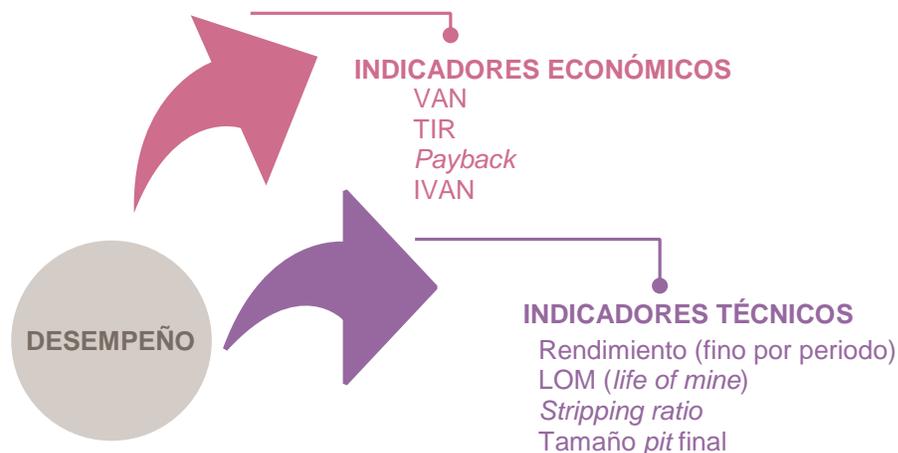


Figura 3-3. Indicadores de desempeño

Como se muestra en la Figura 3-3, los resultados son estudiados a partir de indicadores de desempeño. Para un estudio económico se analiza el VPN, IVAN, *payback* y TIR de cada escenario, mientras que los indicadores técnico-operativos recaen en el estudio del rendimiento, vida de la mina, razón estéril mineral y tamaño del *pit* final.

### 3.4. Resumen

En consecuencia, la metodología aplicada en ambos casos de estudio se resume en lo siguiente:

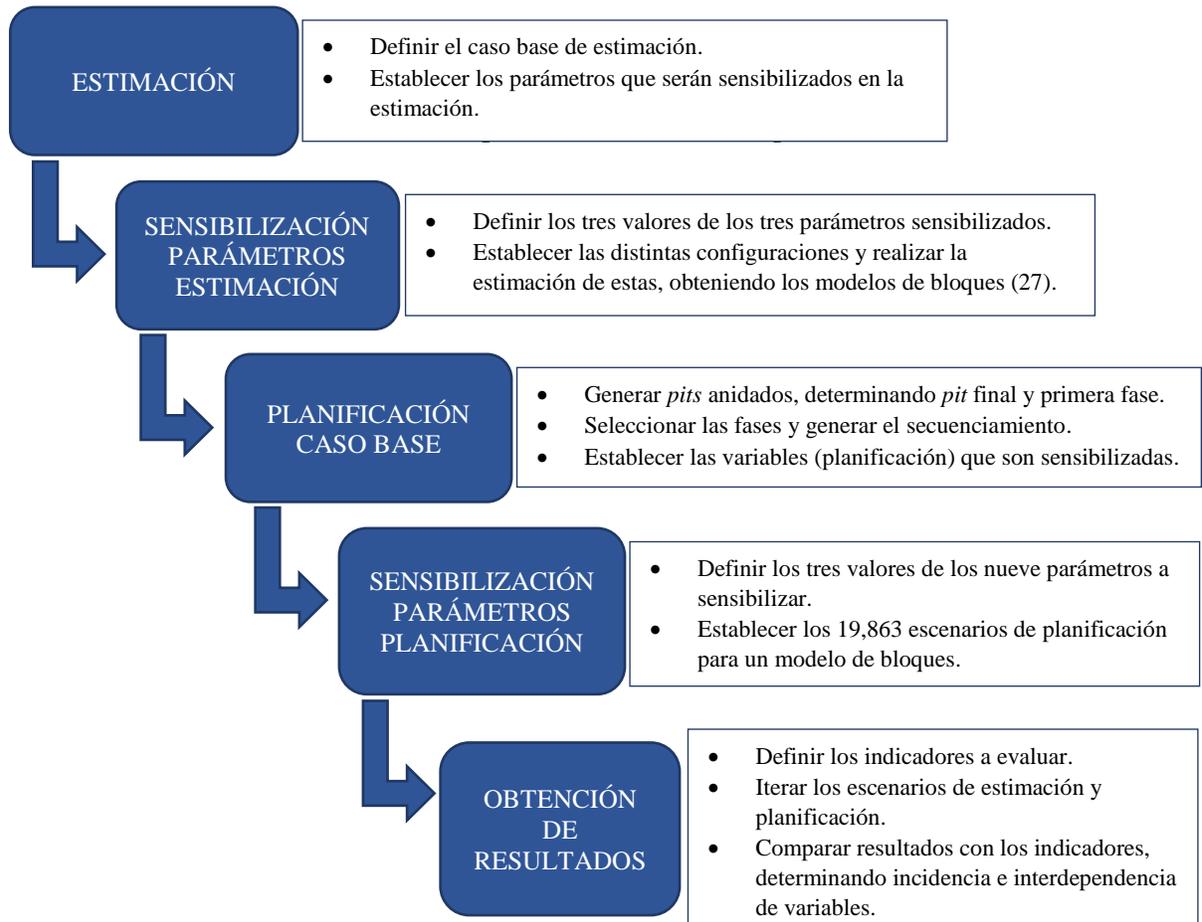


Figura 3-4. Resumen metodología

## 4. CASO 1: DEPÓSITO 01

### 4.1. Modelo Base

#### 4.1.1. Estimación

El depósito corresponde a un yacimiento tipo pórfido, que presenta minerales de cobre y plata. Los compósitos provenientes de los sondajes poseen información sobre la ley de estos dos minerales y de la litología presente en el yacimiento, para lo cual se utiliza solo una unidad para realizar la estimación del cobre y es definido como mineral de sulfuro. El mapa variográfico del cobre se exhibe en la Figura 4-1. Izquierda, donde se obtiene un variograma modelado (Figura 4-1. Derecha) que consta de un efecto pepita de 0.75 y una estructura esférica que presenta un alcance de 215 y una meseta de 0.81. El *kriging* ordinario se realiza a partir de 3 a 15 muestras como mínimo y máximo a considerar. A continuación, se presentan las variaciones realizadas de cada parámetro, contemplando tres valores para cada uno de estos.

Tabla 4-1. Parámetros de la estimación de recursos

Parámetro	Variación Negativa	Caso Base	Variación Positiva
<b>Efecto pepita</b>	0.06	0.075	0.08
<b>Alcance [m]</b>	172	215	258
<b>Número máx de muestras</b>	12	15	18

Se establecen alteraciones de 20% de cada uno de los parámetros, donde es aceptable considerar variaciones de esta magnitud en el alcance del variograma, ya que este valor es tomado a partir de ciertas reglas y visualizaciones del mapa variográfico, en el cual es posible que existan errores asociados a esta definición. Además, se tiene que el efecto pepita puede ser modificado entre  $\pm 20\%$ ; al ser un valor que es estimado a partir de datos espaciados, puede existir pequeñas variaciones en el efecto, es por eso que se disponen cambios de esta magnitud. El número máximo de muestras escogida se sitúa en 15, con las perturbaciones se aprecia cuanto influye contemplar mayor o menor información en la definición del *kriging* ordinario y si está sobre o subestimado al aplicar esta variación.

Si se establecen estos rangos de estimación, se generan 27 modelos de bloques tomando en consideración todas las combinaciones posibles. Los bloques del modelo poseen dimensiones de 20x30x15 metros y este posee una extensión en dirección Norte-Sur de 2800 metros, Este-Oeste de 3500 metros y una elevación de 1200 metros.

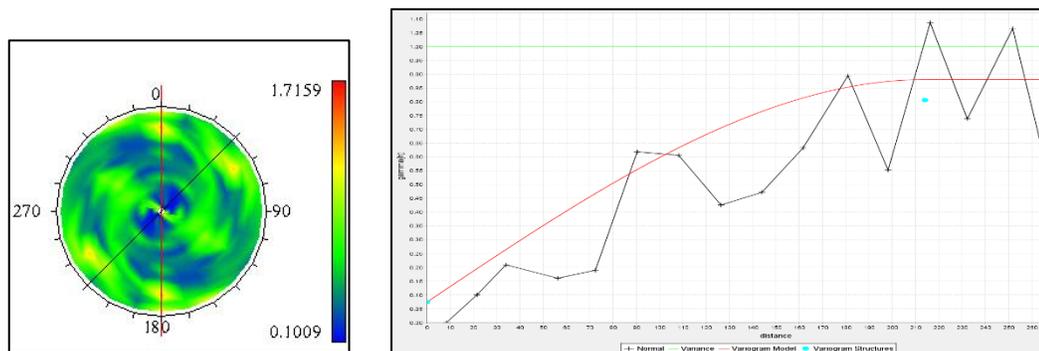


Figura 4-1. Izquierda: Mapa variográfico. Derecha: Variograma modelado

### 4.1.2. Análisis geoestadístico

La Figura 4-2 muestra la curva tonelaje ley del modelo, donde se aprecia que sobre una ley de 0.2% existen cerca de 10,000 millones de toneladas presentes en el depósito, las cuales descienden a cerca de la mitad al tomar en cuenta una ley de corte de 0.4%.

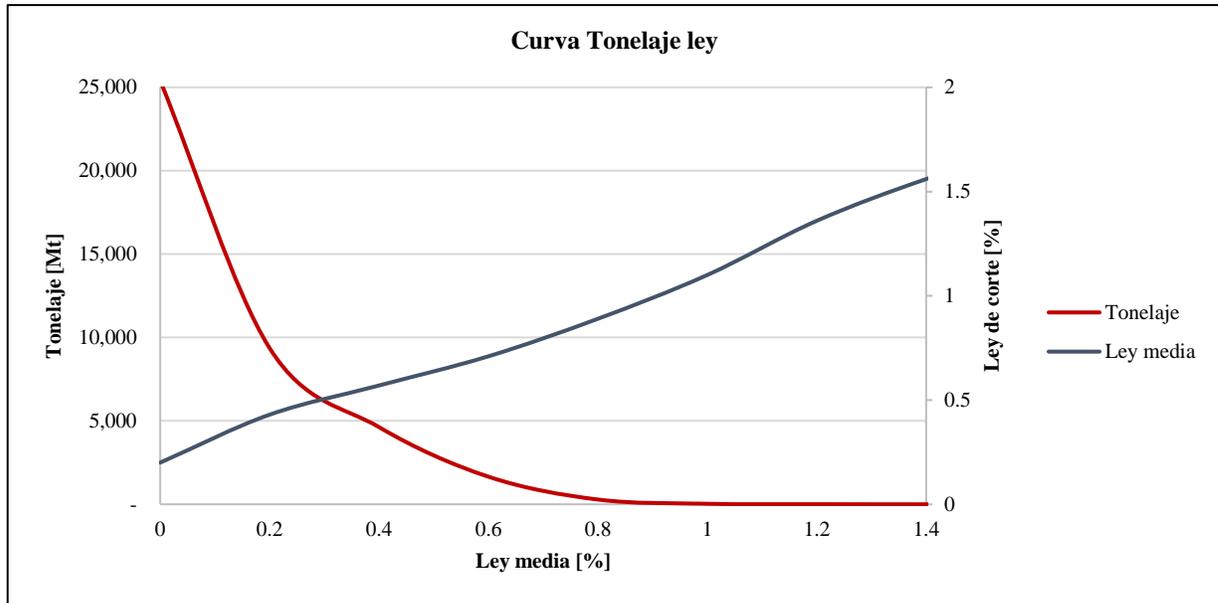


Figura 4-2. Curva Tonelaje - Ley del modelo 01

Al realizar la estimación de los recursos, es utilizada solo una unidad, por lo que la clasificación de los recursos queda delimitada por la zona en la que es realizada la estimación, obteniendo que el tonelaje en esta zona es superior a los 8,000 millones de toneladas, además posee una ley media de cobre de 0.37% y de plata de 0.48 ppm.

Tabla 4-2. Estadísticas básicas Modelo 01

Mineral [Mt]	Ley media Cu [%]	Ley máx. Cu [%]	Fino Cu [Mt]	Ley media Ag [ppm]	Ley máx. Ag [ppm]	Fino Ag [Mt]
8,343	0.37	1.92	3,393	0.14	0.48	998

### 4.1.3. Planificación

Para una mayor eficiencia en la planificación en el programa Whittle, se realiza un rebloqueo del modelo, esto genera bloques de 40x60x15, lo que permite acortar los tiempos de planificación formidablemente sin modificar los resultados que se obtendrían del modelo que no está rebloqueado (20x30x15), ya que con las dimensiones del modelo se pueden establecer estas consideraciones.

Para la definición de los *pits* anidados, se toma en cuenta la metodología alternativa al empleo del componente *Revenue Factor* convencional y es establecida a partir del uso de un punto de inicio y dirección de minado (Poblete et al., 2016b), que causa un mayor beneficio y produce fases más operativas entre sí, para mejorar la continuidad de extracción de mineral.

La planificación estratégica se realiza con los parámetros utilizados en la tabla 4-3, donde el caso base es el empleado para la creación inicial del *pit* final y de las fases operativas, para su posterior iteración. Considerando estos nueve valores y sus respectivas variaciones mencionadas a continuación, se generan 3<sup>9</sup> potenciales escenarios de planificación.

**Tabla 4-3. Parámetros utilizados en la metodología de sensibilización**

Parámetro	Variación Negativa	Caso Base	Variación Positiva
<b>Ángulo [°]</b>	46	48	50
<b>Número bancos</b>	8	12	16
<b>Recuperación [%]</b>	87	89	91
<b>Ley de corte [%]</b>	0.54	0.6	0.66
<b>Costo planta [US\$/t]</b>	9.5	10	10.5
<b>Costo mina [US\$/t]</b>	1.8	1.9	2
<b>Precio cobre [US\$/lb]</b>	2.58	2.72	2.86
<b>Capacidad planta [t/año]</b>	19,800,000	20,000,000	22,200,000
<b>Capacidad mina [t/año]</b>	63,000,000	70,000,000	77,000,000

El ángulo establecido como caso base está dentro de los rangos típicos de las faenas mineras. Las variaciones de este valor oscilan entre  $\pm 5\%$ , debido a que contemplar un ángulo superior excede rangos comunes de las faenas, a su vez, considerar ángulos inferiores a  $45^\circ$  es demasiado conservador para una evaluación eficaz. El número de bancos considerados para el ángulo global es típicamente 12, donde se analizan modificaciones hasta 8 y 16 bancos, representando niveles aceptables para el tipo de depósito que es evaluado.

La recuperación del mineral comúnmente oscila entre los porcentajes de 87% a 92%, es por esto que, como caso base se establece el mencionado en la tabla 4-3 y se asignan permutaciones del orden de  $\pm 2.5\%$ . Cabe mencionar que variaciones mayores a esto, se perciben como poco aceptables (recuperaciones inferiores al 86%) o difíciles de implementar (sobre el 94%).

Los costos de minado y procesamiento son tomados entre los rangos típicos en faenas de esta envergadura y se aplican modificaciones del  $\pm 5\%$  para no sobre(sub) estimar inconsistentemente los costos utilizados. En el caso del precio del cobre, se instaura un rango similar al determinado por Cochilco para las últimas estimaciones a largo plazo, donde se fijan perturbaciones del orden del 5% para este caso. Esto es aplicable siguiendo la lógica del precio del cobre señalado a largo plazo en diversos informes de la entidad mencionada anteriormente.

Considerando la base del estudio, se tiene una ley de corte marginal de 0.25% de Cu; independiente de este rango, se emplea una ley de entrada a proceso mayor a la definida por estos, ya que se busca establecer las incidencias de los distintos parámetros que definen la planificación. Entonces, si se aplica como caso base la ley de corte marginal, no permite un mayor análisis de la influencia de las alteraciones sobre este parámetro. Sumado a esto, como se menciona en el capítulo anterior, es preferible utilizar una ley mínima de entrada a proceso mayor a la establecida como ley marginal, para aumentar el beneficio económico recibido del depósito, incluyendo el uso de acopio como fuente de mayor generación de valor. Por lo tanto, la ley mínima de entrada a proceso queda definida en 0.6%, ya que determina una mayor holgura comparado con el efecto de no restringir el mineral entrante a proceso y, además, se pueden realizar variaciones de  $\pm 10\%$  de los valores de esta.

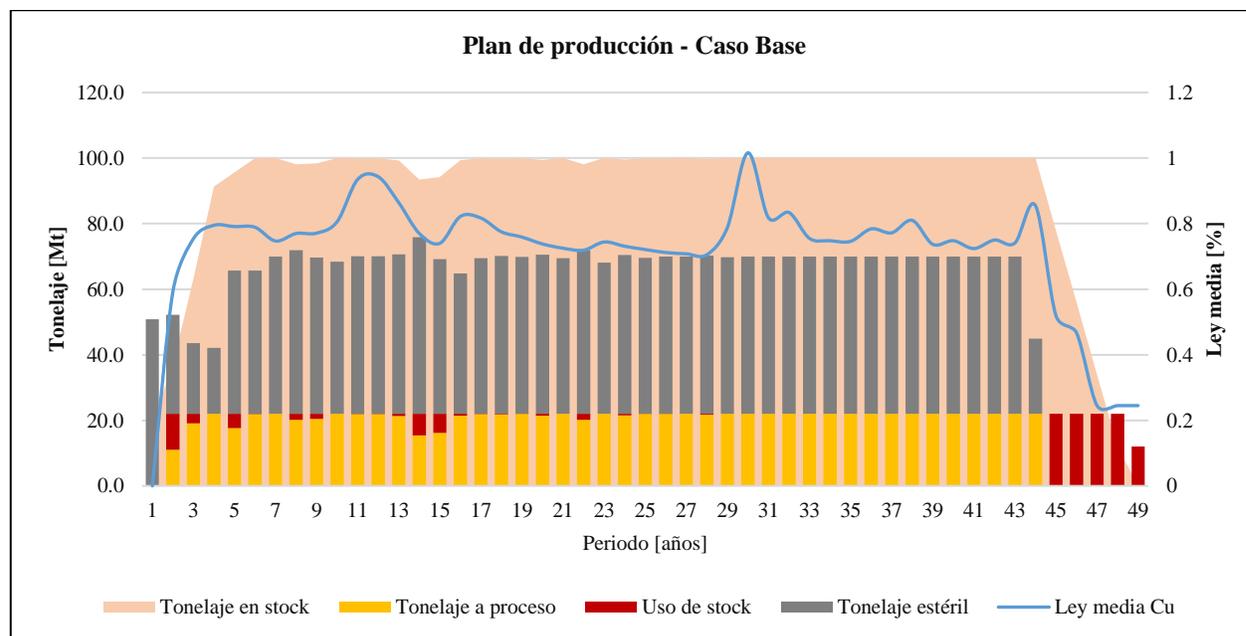
La tasa de procesamiento base viene dada por el mineral presente en el yacimiento y que se pueda establecer un plan concordante a lo requerido, donde variaciones del orden del 10% permiten comparaciones acordes al estudio y no se realizan sobrestimaciones producidas por la valoración del CAPEX. Algo similar ocurre con la capacidad de minado establecida como base, ya que se debe tomar en cuenta que los planes tienen que ser correctamente formulados para poder realizar comparaciones efectivas. En otras palabras, las tasas utilizadas no pueden sobrepasar los límites para que la extracción y producción (de las sensibilizaciones realizadas) sea constante durante la vida de la mina.

Para construir el *pit* final operativo y las fases óptimas preliminares, se ocupa el caso base mencionado anteriormente, además se considera el uso de *stockpiles* para realizar una correcta planificación, estableciendo un límite físico del acopio de 100 millones de toneladas. Además, se aplican los parámetros técnico-económicos de la tabla 4-4, los cuales no son parte del estudio de la metodología.

**Tabla 4-4. Otros parámetros planificación**

Parámetro	Valor
<b>Precio plata [US\$/toz]</b>	20
<b>Costo venta plata [US\$/toz]</b>	4.5
<b>Costo venta cobre [US\$/lb]</b>	0.3
<b>Tasa de descuento [%]</b>	10

Escogidos los parámetros para diseñar el escenario base, se obtiene el plan de producción (Figura 4-3) que posee más de 40 años de vida útil, contemplando el uso de pilas de *stock*, principalmente requeridas en los periodos finales de la mina, cuando ya no se posee mineral a explotar en la operación, además se considera un año de *pre-stripping* y se obtiene una ley de cobre media anual cercana a los 0.8% durante casi toda la vida de la faena. El plan de producción genera un VPN de 1,100 MUSD, con una razón estéril-mineral de 1.9. Los indicadores económicos muestran un *payback* de 7.9 años y una TIR de 13.4%.



**Figura 4-3. Plan de producción Caso Base, Modelo 01**

Para el plan mencionado se escoge un set de 6 fases (ver Figura 4-4), las cuales poseen una dirección preferencial hacia el Este (según la metodología mencionada anteriormente). La Figura 4-5 muestra la relación de tonelajes en las distintas las fases, donde se observa claramente que la primera fase es más pequeña y que la tercera fase es la que posee mayor extracción de mineral, con 190 [Mt]. También se aprecia que la razón estéril-mineral va aumentando hacia las fases finales sobrepasando el valor de 3.5.

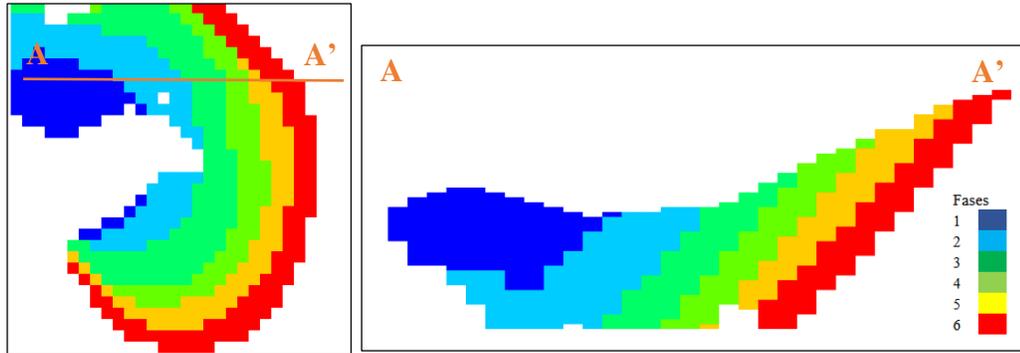


Figura 4-4. Fases Modelo 01. Izquierda: Vista en planta. Derecha: vista perfil

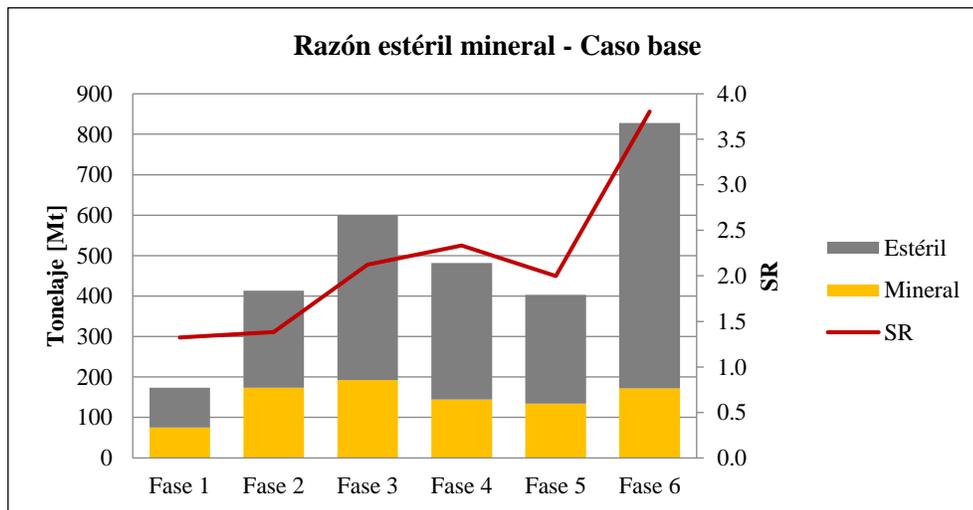
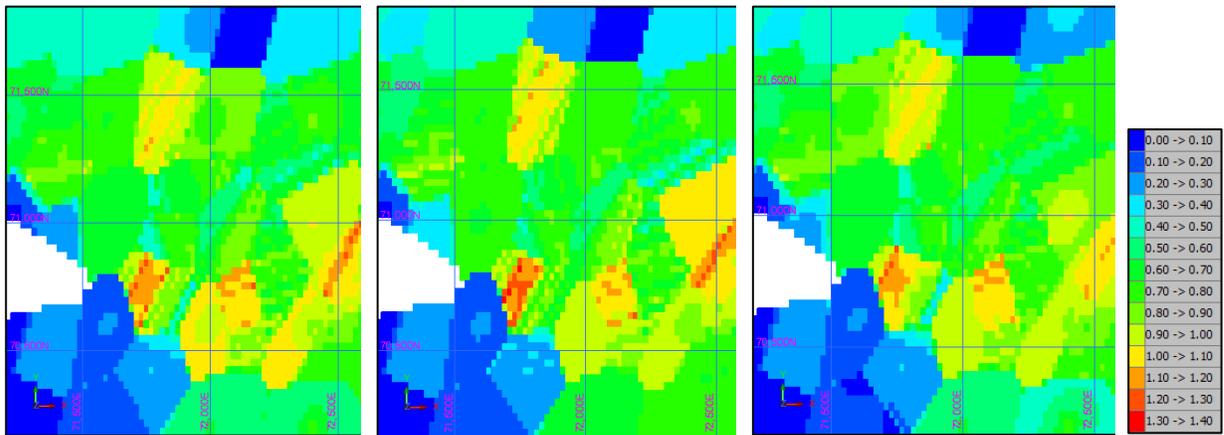


Figura 4-5. Razón Estéril Mineral de las fases

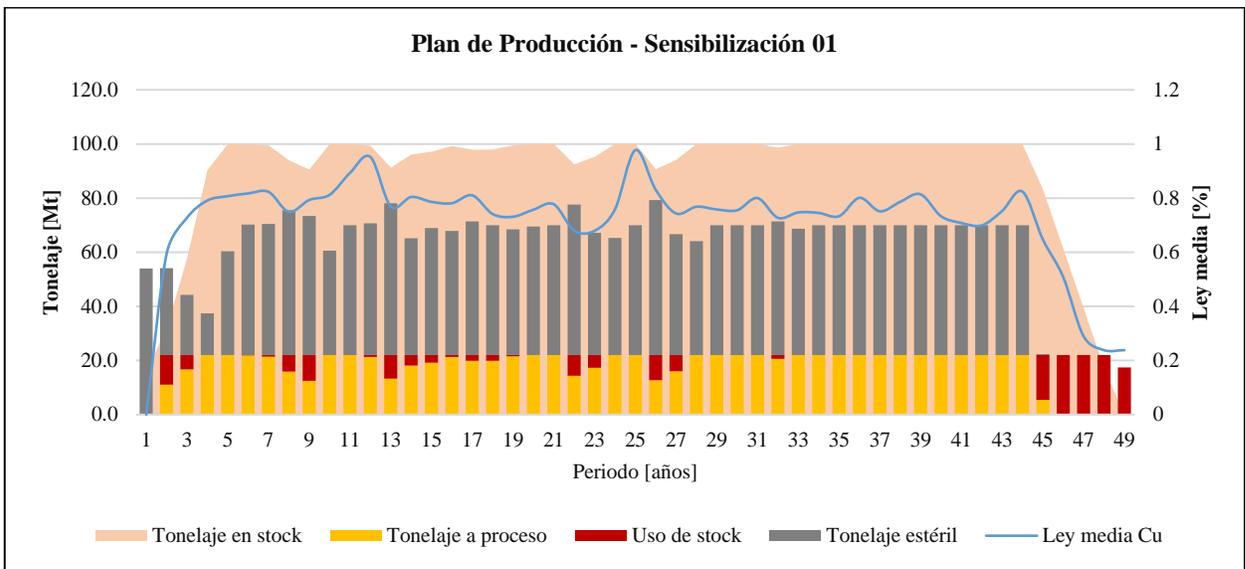
## 4.2. Resultados MODELO 01

### 4.2.1. Estimación

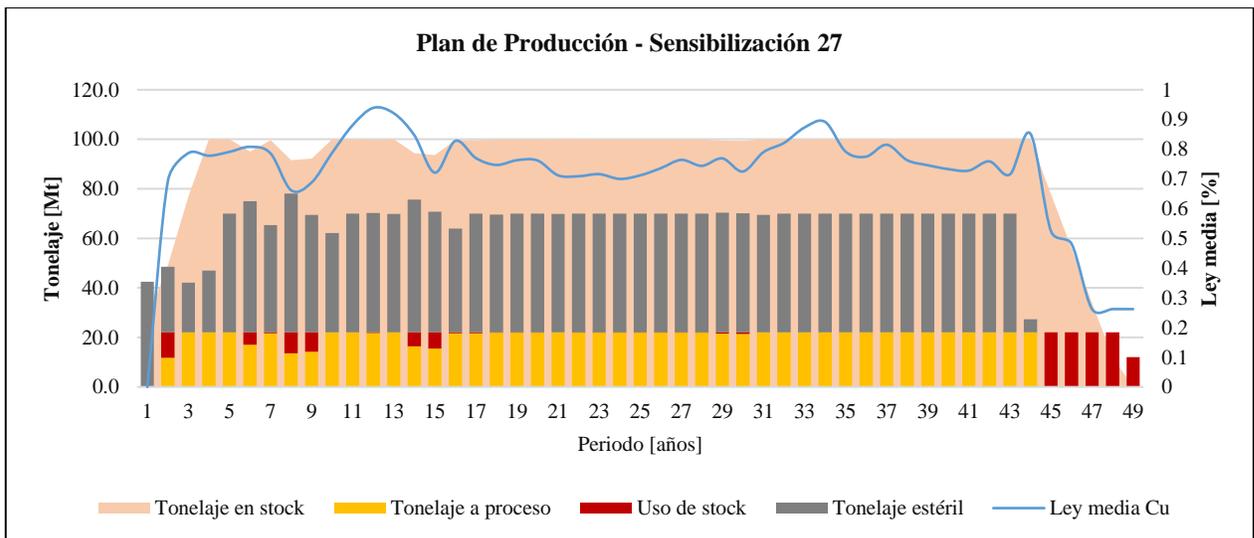
Los resultados de las iteraciones de los parámetros de estimación permiten estudiar los distintos modelos de bloques que son generados, donde se aprecian diferencias notorias en la estimación de las leyes de cobre dentro del depósito. En la Figura 4-6 se muestra una vista en planta del depósito para el modelo base (Izquierda), el modelo realizado por variaciones de -20% en las variables de estimación (Central), el cual es la sensibilización 01 de las iteraciones y el compuesto por permutaciones del orden de -20% en estos (Derecha), correspondiente a la sensibilización 27.



**Figura 4-6. Vista en planta del depósito. Izquierda: Modelo base. Central: Sensibilización 01 (variaciones de -20%). Derecha: Sensibilización 27 (variaciones de +20%)**



**Figura 4-7. Plan de producción, Sensibilización 01**



**Figura 4-8. Plan de producción, Sensibilización 27**

Las variaciones en los parámetros de estimación afectan directamente el plan de producción, tanto de manera local como a nivel global. Con respecto a lo primero, las Figuras 4-7 y 4-8 exhiben los planes de producción de la sensibilización 01 y 27, que corresponden a los modelos de bloques construidos con modificaciones en los parámetros de estimación, de -20% y +20%, respectivamente. Es posible observar los cambios presentes en los escenarios evaluados, en el cual es afectado el uso temporal del acopio, donde en la sensibilización 01 se aprecia que es mayormente utilizado en diversos periodos donde no se alcanza la extracción de mineral de forma relativamente constante en comparación con la sensibilización 27. Además, se distinguen alteraciones significativas en la distribución de las leyes de forma anual, donde el modelo base presenta una disposición más equitativa de este factor a través de los años, mientras que para el plan de la sensibilización 01, las leyes medias son más dispares y se genera acopio con menor ley media.

Estudiando las incidencias de los parámetros a escala global, se observa que variaciones de  $\pm 20\%$  en el alcance del variograma provocan un aumento del VPN sobre un 5%, algo similar ocurre con modificaciones en el efecto pepita, donde el caso base es el que posee menor valor económico y al aplicar alteraciones del orden de  $\pm 20\%$  generan un ascenso en el VPN de un 3%. Además, considerar diferencias en la información utilizada en la estimación, se establece que presentar un menor número máximo de muestras reduce el VPN en un 3% y poseer más información lo incrementa en un 8%. Con respecto al *payback*, variaciones en estos parámetros provocan disminuciones del orden de un 3% a 7%. El resto de los indicadores críticos a evaluar no presenta cambios de grandes magnitudes.

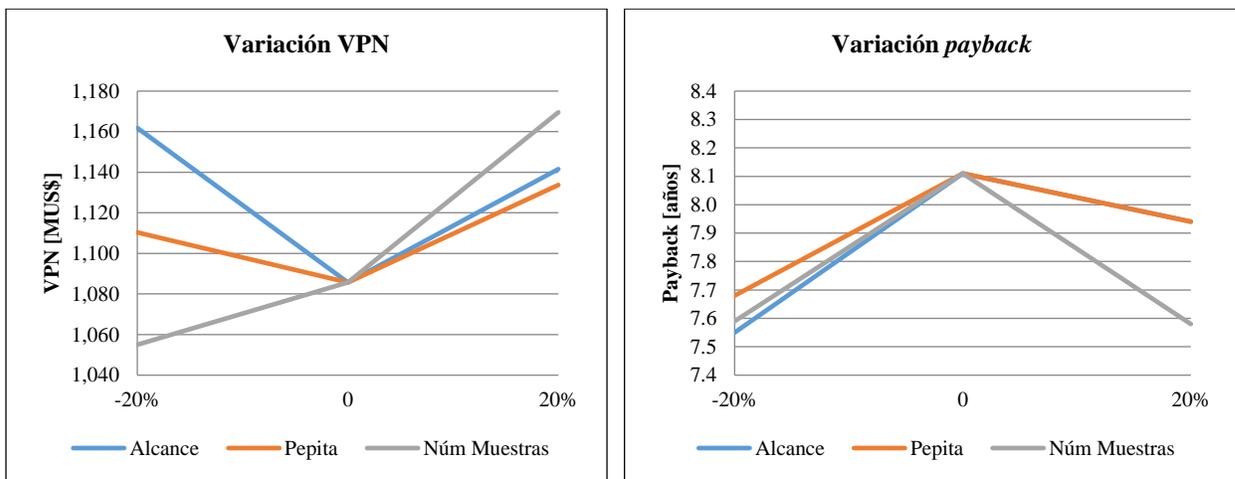


Figura 4-9. Sensibilización de variables de estimación. Izquierda: Impacto en el VPN. Derecha: Impacto en el *payback*

Profundizando en la interdependencia de las variables de estimación, se distingue en la Figura 4-10. Derecha, que, a mayor número máximo de muestras a considerar, el VPN sugiere un incremento para alcances del variograma menores; en cambio, para un alcance mayor, el comportamiento del VPN es similar para distintos números de muestras. Observando los parámetros del modelo variográfico, se tiene que un aumento del 20% en ambos conceptos, mejora el VPN en un 4%, pero el mayor beneficio es generado cuando existen solo disminuciones en el alcance de este.

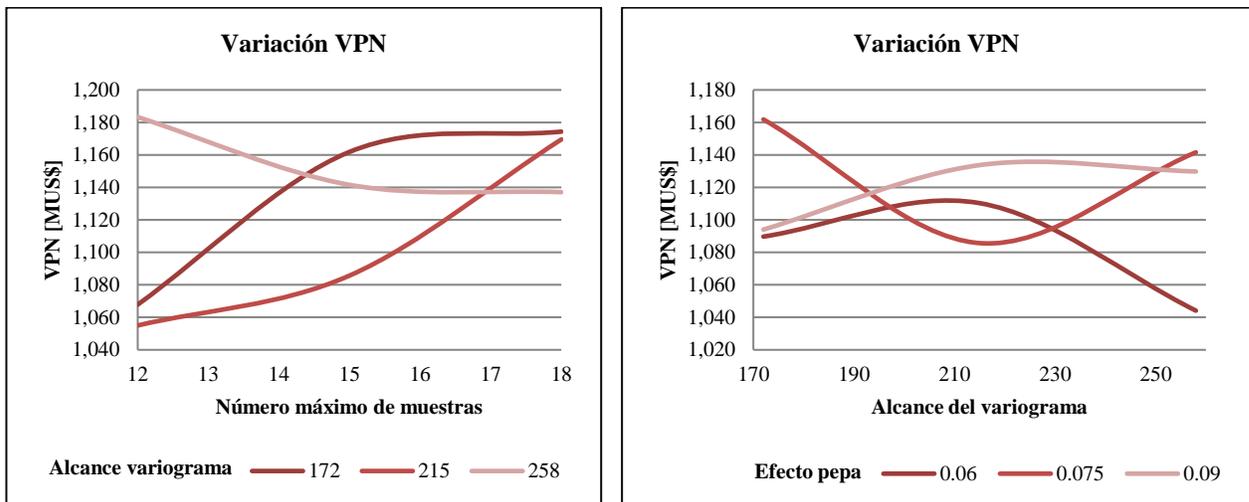


Figura 4-10. Interdependencia en la estimación. Izquierda: Impacto en VPN (número máximo de muestras y alcance del variograma). Derecha: Impacto en VPN (alcance del variograma y efecto pepita)

Con respecto al tamaño y forma del *pit* final, existen leves diferencias de tonelaje entre los distintos escenarios de estimación, donde uno de los grandes cambios de tonelaje se encuentra cuando se considera mayor cantidad de muestras a un bajo alcance del variograma, en el cual el *pit* reduce en un 2% su tonelaje. De manera similar, las perturbaciones en el fino de cobre recuperado son bastante leves, donde en la Figura 4-11 se distinguen ligeros cambios en este indicador, esencialmente existe una sobre estimación del cobre recuperado cuando hay mayor efecto pepita. Contemplando la interdependencia de las variables, la mayor cantidad de cobre recuperado se obtiene al tomar en cuenta menor cantidad de información (menor número máximo de muestras), con alcances del variograma altos, donde existe un aumento de un 3% en este aspecto.

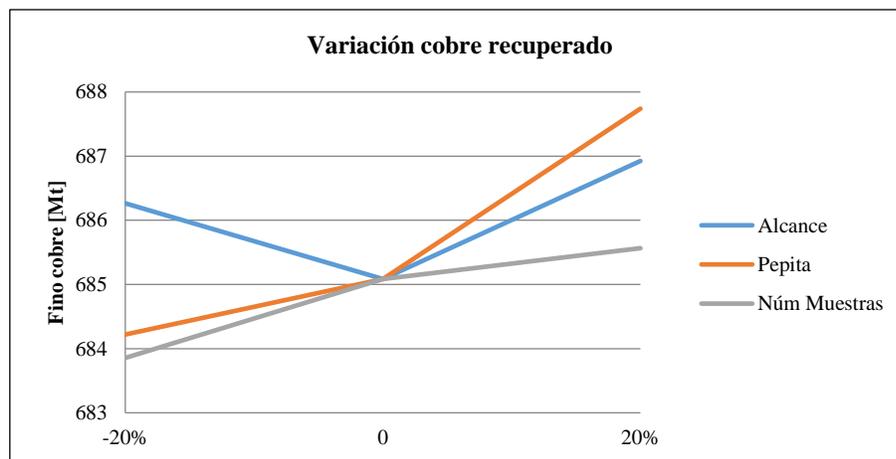


Figura 4-11. Sensibilización en estimación. Impacto en cobre recuperado

#### 4.2.2. Planificación

La distribución del VPN de todos los escenarios de planificación estudiados se presenta en el siguiente histograma (Figura 4-12), donde se percibe que cerca de la mitad de los casos poseen desviaciones menores al 25% de la valorización del plan. Además, un tercio de los escenarios se encuentra entre los 45 y 50 años de LOM, los histogramas de los distintos indicadores técnicos y económicos están en anexos.

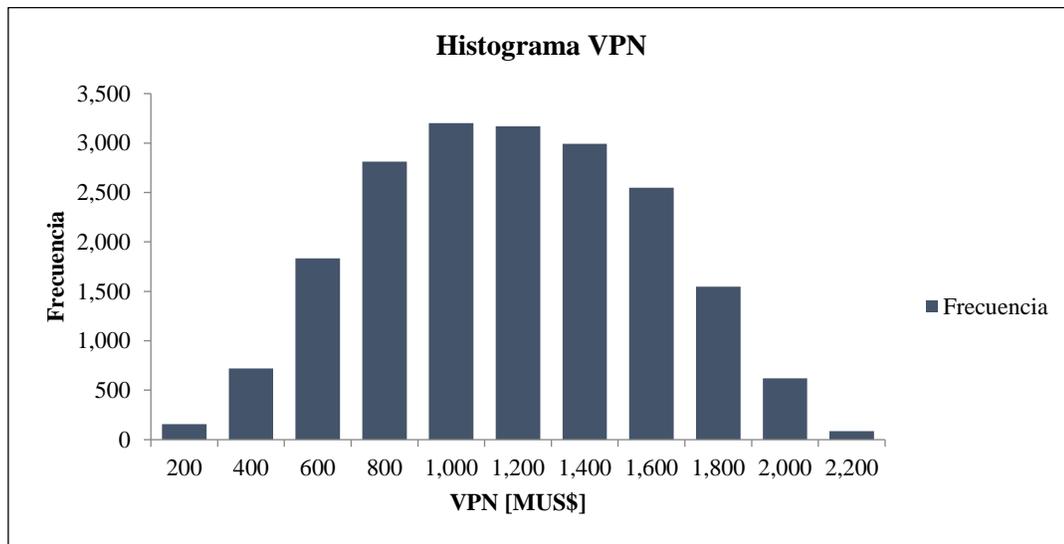


Figura 4-12. Histograma VPN

Observando el efecto de los parámetros de forma independiente (Figura 4-13), se establece que la mayor incidencia corresponde a variaciones en el precio del cobre, donde una disminución de este factor reduce en un 30% el VPN del proyecto, además, el comportamiento del VPN se ve afectado de manera sustancial por la ley de corte y la recuperación, donde un aumento en estas variables genera un incremento en la valorización sobre un 15% (en cada uno de estos por separado). Es importante recalcar la sensibilidad del VPN que se provoca al modificar de  $48^\circ$  a  $50^\circ$  (ascenso de un 12% en el VPN) y la poca alteración que existe al rebajar de  $48^\circ$  a  $46^\circ$  el ángulo (VPN decrece en un 2%), lo que revela que en ciertos casos es posible ser más conservador afectando de manera marginal el beneficio económico del proyecto. Además, la cantidad de mineral que es recuperado deriva en muchos casos de la perturbación en el ángulo del *pit*, dependiendo completamente de la forma que posea el depósito.

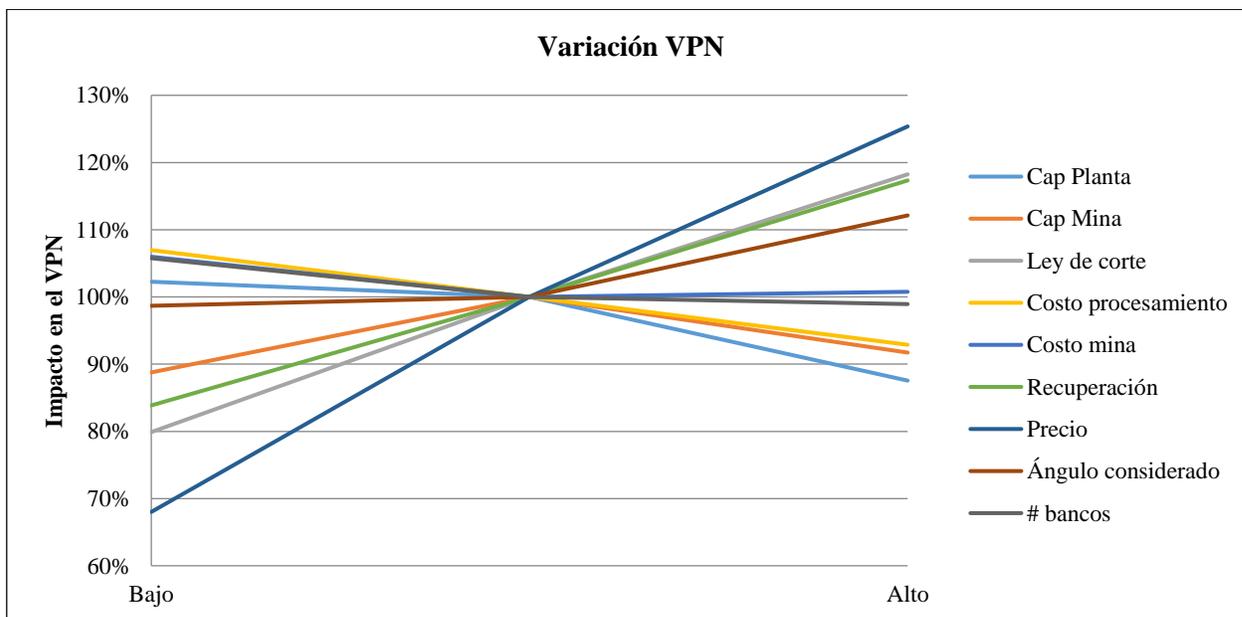


Figura 4-13. Sensibilización de parámetros planificación. Impacto en VPN

La Figura 4-14 muestra el efecto sobre el VPN al realizar sensibilizaciones positivas de las variables (aumentar su valor), en rojo se advierte un incremento, mientras que el azul representa una disminución del beneficio económico. Se aprecia que claramente un alza en el precio eleva sobre un cuarto el VPN, luego son observadas mejoras similares considerando cambios en la ley de corte y la recuperación. Además, se distingue que las tasas de procesamiento y minado provocan una decaimiento del VPN, en un 12% y 8% respectivamente.

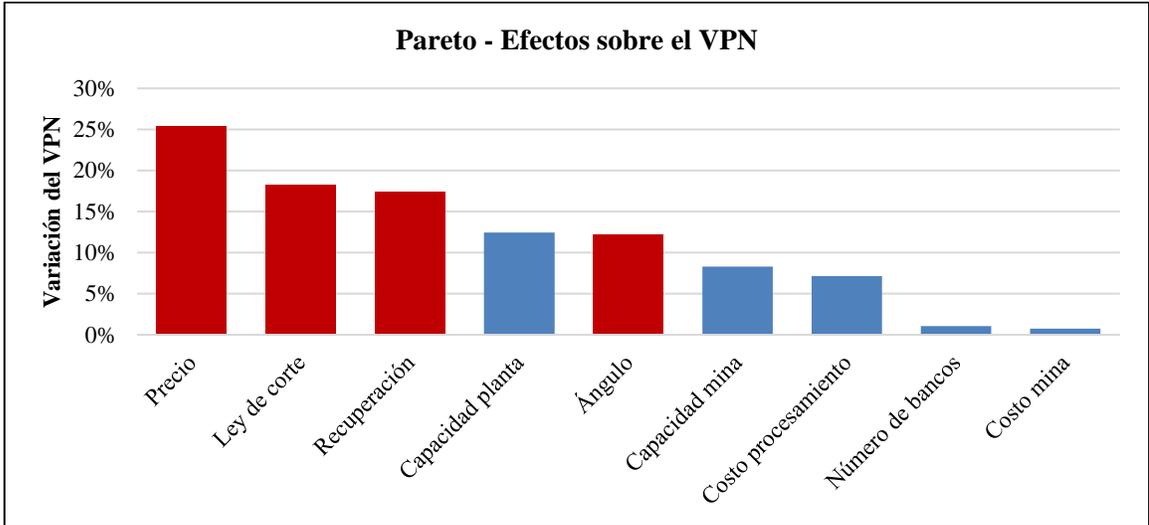


Figura 4-14. Pareto variables planificación. Impacto en VPN

Otro indicador económico por evaluar es la TIR, donde se señala en la Figura 4-15 que este indicador es poco sensible a variaciones de diversos parámetros. Destacando que el mayor impacto se produce en un aumento del 5% de la TIR cuando se evalúa en escenarios óptimos del precio del cobre, mientras que, para escenarios pesimistas, este indicador se aminora en un 8%. Si se observan las distintas escalas de producción, se tiene que una disminución de la tasa de procesamiento eleva la TIR en un 4%, mientras que una reducción de la ley de corte atenúa este factor en similar escala.

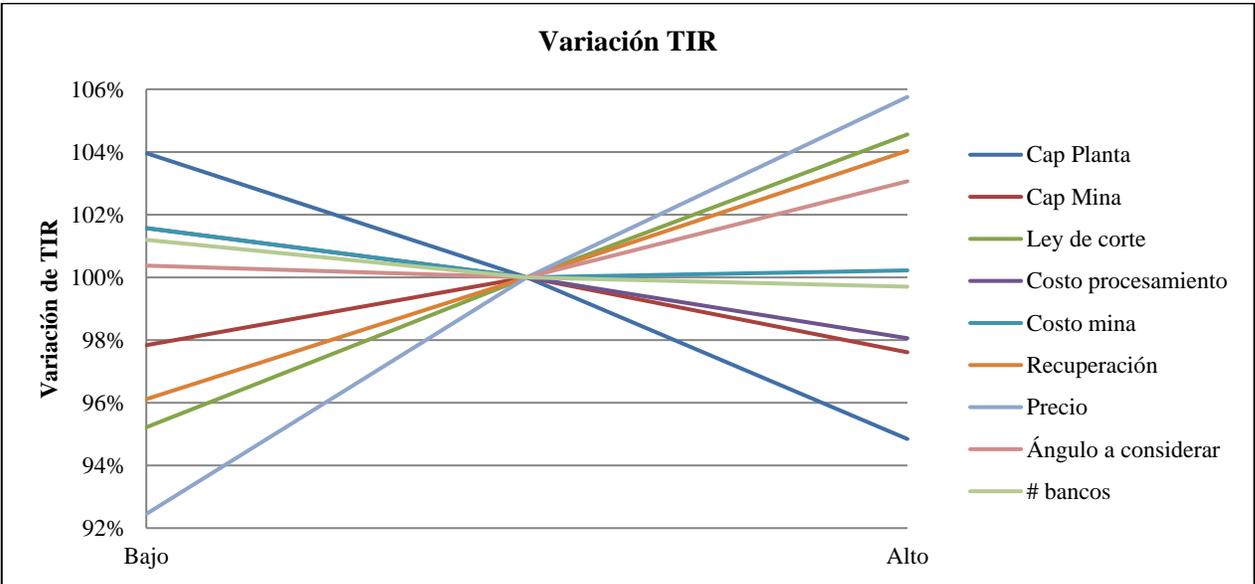


Figura 4-15. Sensibilización variables planificación. Impacto en TIR

Aparte de los indicadores económicos, es necesario realizar un estudio sobre el impacto en los factores técnicos y operativos de la faena, con respecto a esto, es preciso evaluar la vida de la faena (Figura 4-16. Izquierda) donde se percibe que el mayor impacto es observado cuando se produce un aumento en la ley mínima de entrada a proceso, lo que puede reducir en un 12% el LOM, mientras que un ascenso en la capacidad de mina provoca una disminución de este indicador en un 8%, el único factor que provoca alguna alza sustancial en la vida de la mina es el crecimiento del precio, que causa variaciones del orden del 3%, esto representa la extensión de más de un año de vida útil de la faena.

Con respecto a la razón estéril mineral (Figura 4-16. Derecha), los parámetros de escalas de producción son los factores que más incidencia tienen en esta relación, destacando que una ampliación en la capacidad de minado provoca una elevación del SR en un 14%, mientras que una extensión de la tasa de procesamiento de mineral provocan descensos del orden del 13% en la razón estéril mineral. Realizando estudios en las escalas de producción, se tiene que existen cambios sustanciales en esta razón para diversas combinaciones de estas. Destacando que una disminución de la tasa de minado (-10%) y un aumento conjunto en la tasa de procesamiento y ley de corte en un 10%, provocan decrecimientos del SR de hasta un 28%, llegando a valores de 1.3-1.4.

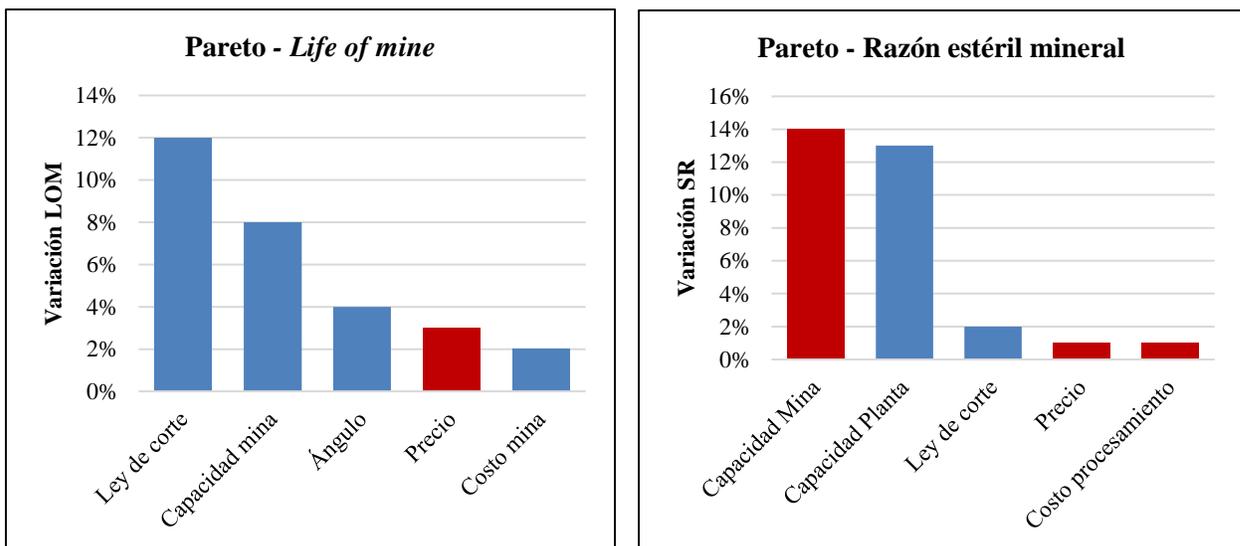


Figura 4-16. Pareto sensibilización variables de planificación. Izquierda: Impacto en LOM. Derecha: Impacto en SR

El parámetro que posee mayor incidencia en el tonelaje del *pit* final es la ley de corte, donde un incremento de este valor logra reducir en un 13% el tamaño de este, además un escenario optimista del precio eleva el tonelaje cerca de un 4%, mientras que un alza en el ángulo ocasiona bajas de más de un 4%. Incluso, considerando un alto costo de minado, de ley de corte y ángulo en la evaluación del proyecto, el tonelaje puede decaer sobre 600 millones de toneladas (20%), esto principalmente debido a la alta ley de corte que causa que exista gran cantidad de mineral de baja ley que quede fuera del *pit* final y el aumento en el costo de minado genera que bloques en mayor profundidad sea más caro poder extraerlos, obteniéndose una gran decadencia del tamaño de la envolvente económica. Estas variaciones no producen drásticos cambios en el VPN del proyecto, ya que el cobre que es recuperado disminuye en menor medida (10%-12%) y posee mayor ley media, por lo que la valorización del proyecto declina mesuradamente.

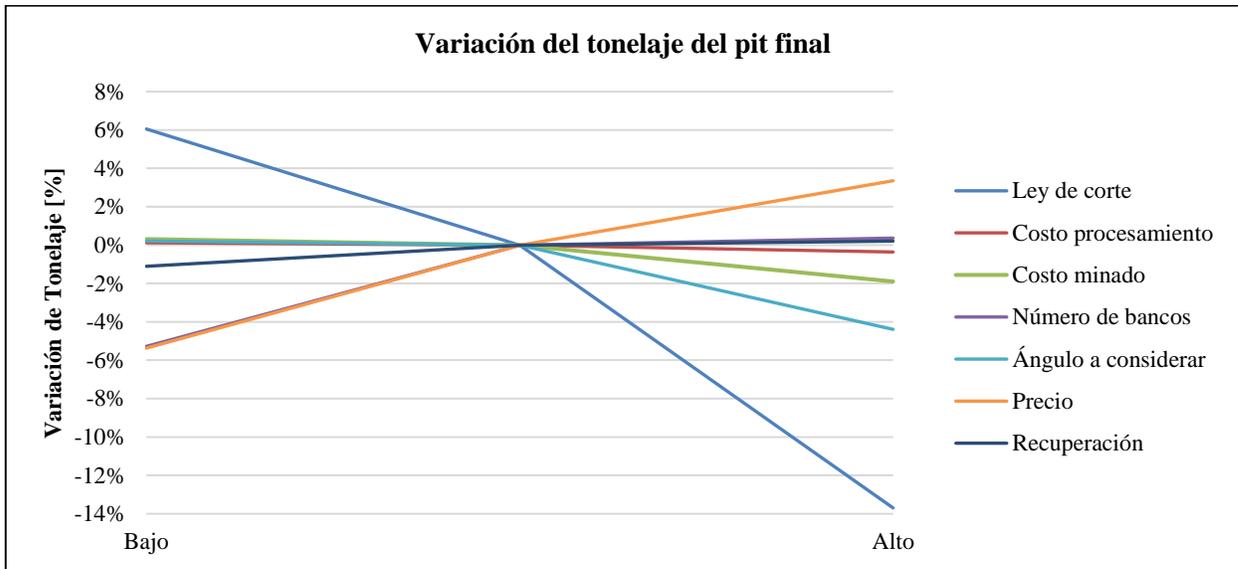


Figura 4-17. Sensibilización en variables de planificación. Impacto en tonelaje de *pit* final

Observando los parámetros geomecánicos que son sensibilizados (Figura 4-18 Izquierda), se aprecia que, a mayor ángulo de talud, se obtiene un mejor provecho, esto se acrecienta en gran medida cuando se utiliza un mayor número de bancos para el estudio realizado, pero cuando es considerado un número menor de este, el beneficio económico es similar para variaciones del ángulo. Con respecto a la cantidad de fino que se recupera según cambios en la geomecánica, se distingue que a mayor ángulo es obtenida menor cantidad de fino, pero también se produce que existe mayor VPN, esto se explica porque al ser más vertical la inclinación, el *pit* final es más pequeño, por lo que existe menor estéril que debe extraerse.

Si se aprecia la Figura 4-19, se advierte que a medida que el ángulo se eleva, el VPN incrementa hasta sobre los 1,200 MUS\$ con un ángulo máximo de 49°, seguir intensificando este valor no provoca un mayor beneficio económico, ya que, como se percibe en el mismo gráfico, el fino que es recuperado va decreciendo en gran medida, por lo tanto, provoca ganancias marginales seguir aumentando el ángulo a partir desde cierto punto, ya que depende de la forma y el tipo del depósito que se evalúa.

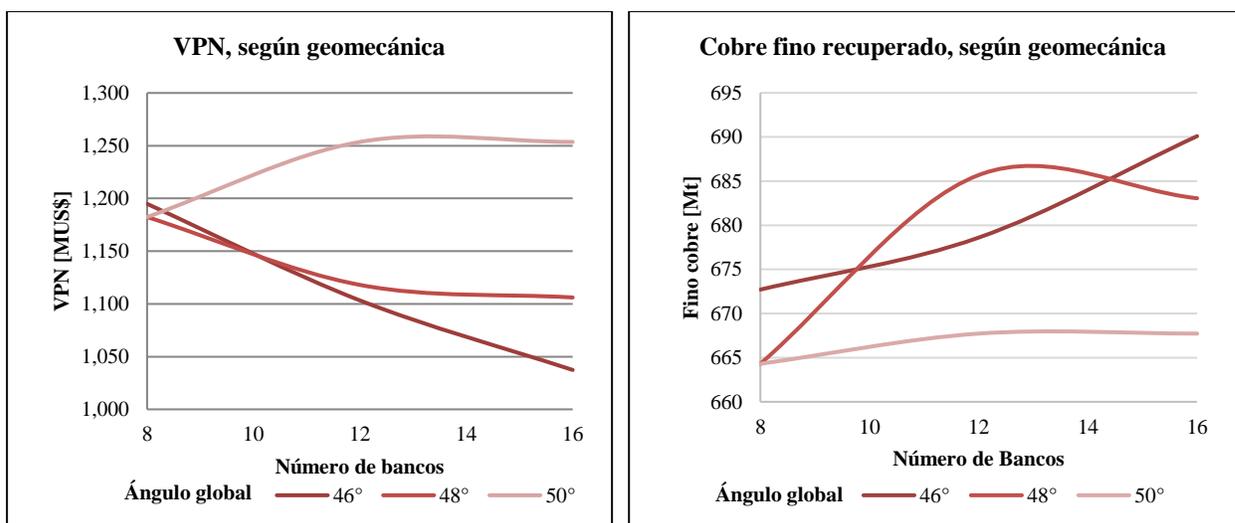


Figura 4-18. Sensibilización según geomecánica. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en cobre fino recuperado

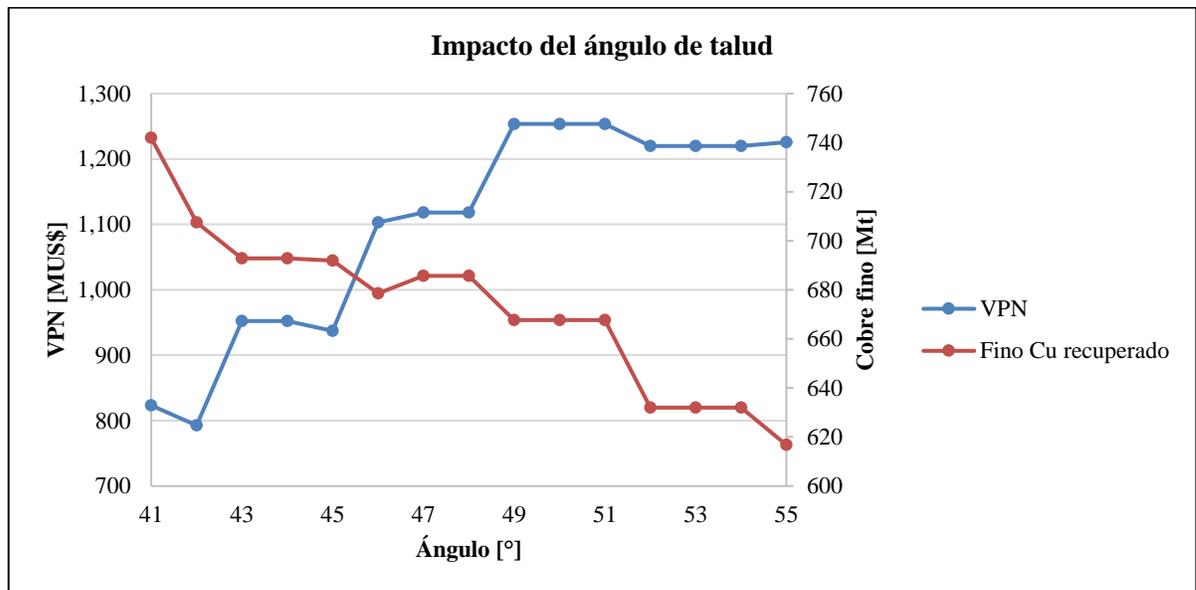
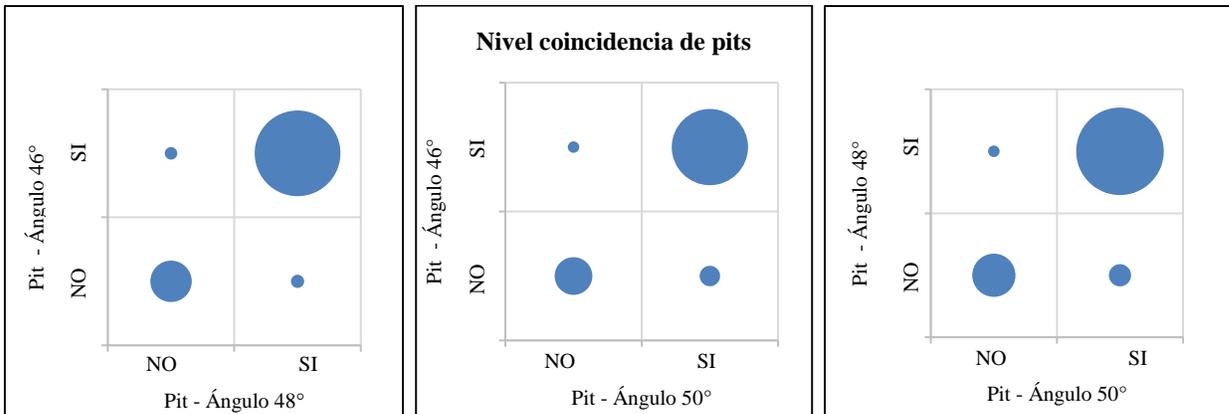


Figura 4-19. Sensibilización según ángulo. Impacto en VPN y cobre fino recuperado

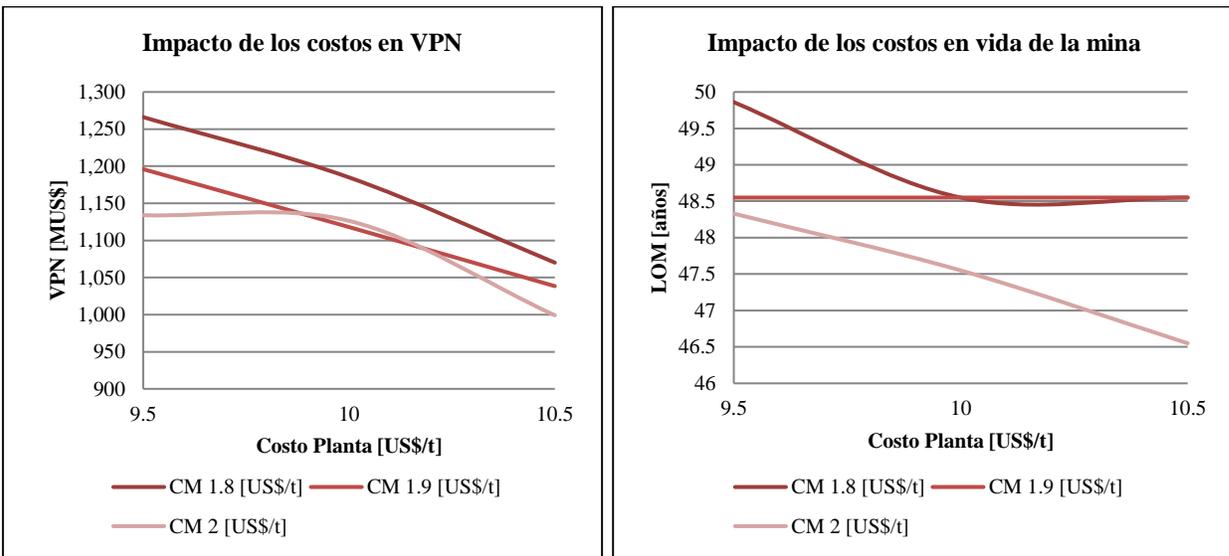
Es necesario realizar un estudio de cómo cambia el tamaño y forma del *pit* final al variar el ángulo utilizado, para ello se realiza un nivel de coincidencia de las envolventes económicas seleccionadas, estableciendo el número de bloques que pertenecen conjuntamente a los diferentes *pits* y cuáles de estos se encuentran solo en uno u otro, ya que existe la posibilidad que el tonelaje final del *pit* sea similar, pero que no posean la misma forma dependiendo de las variables estudiadas, en este caso la alteración del ángulo. La Figura 4-20 muestra tres gráficos que representan combinaciones de tres variaciones de ángulos. Para cada uno de estos, existe dos posibilidades en los ejes: la opción “NO”, que indica el porcentaje de bloques que no se localiza dentro del *pit* y la opción “SI”, para los bloques dentro del *pit*. La sección estudiada del modelo de bloques comprende la zona donde está intrínsecamente el *pit* final, por lo que la razón de los bloques que no están en ninguna de las envolventes seleccionada no representa cabalmente la totalidad de bloques del modelo que no pertenecen a los *pits* estudiados.

Tomando en cuenta la Figura 4-20. Izquierda se observa que existen cerca de 70 millones de toneladas (aproximadamente 2,900 bloques) que se ubican en el *pit* de 46° y que no están dentro del *pit* generado por un ángulo de 48°, por el contrario, hay más de 60 millones de toneladas que sí están en este último y no se encuentran dentro de la envolvente creada por un ángulo de 46°, lo que representa sobre un 3% del tamaño final del *pit*. La mayor diferencia se localiza entre las inclinaciones de 46° y 50° (Figura 4-20. Central), donde existen sobre 200 millones de toneladas que pertenecen al *pit* generado por un ángulo de 46° y que no están en la envolvente seleccionada por los 50°; pero, existen cerca de 60 millones de toneladas que están en el *pit* de 50° y no están en el mencionado en un comienzo, por lo que al variar la inclinación cambia la forma y la cantidad de bloques que pertenecen a la envolvente económica. La Figura 4-20. Derecha, apunta que también existen cambios apreciables dentro de los *pits* formados por 48° y 50°, donde existen más de 6,000 bloques (6% del tamaño final del *pit* de 48°) que pertenecen al citado y no se localizan dentro del formado por una inclinación de 50°, existiendo por su parte, cerca de 2,500 bloques (cerca de 65 millones de toneladas) que sí están en el *pit* de 50° y no dentro del evaluado en un comienzo.



**Figura 4-20. Nivel de coincidencia de los pits variando ángulos. Izquierda: comparación entre pits con 46° y 48°. Central: comparación entre pits con 46° y 50°. Derecha: comparación entre pits con 48° y 50°**

La Figura 4-21 muestra el impacto producido por sensibilizaciones realizadas en los costos de minado y de procesamiento del mineral, donde en la Figura 4-21. Izquierda se observa el efecto sobre el VPN, destacando que una disminución del 5% en ambos factores aumenta el VPN sobre un 13%, mientras que el mismo incremento porcentual de ambos conceptos reduce el valor en un 9%; este mismo efecto produce una rebaja de más de dos años en la vida útil de la mina. Además, es posible percibir que el crecimiento de los costos puede menguar en más de un 5% el fino que se recupera dentro del *pit*, lo que es concordante con la depreciación del beneficio económico generado en este escenario.



**Figura 4-21. Sensibilización de costos. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en vida de la mina**

Observando las escalas de producción, se aprecian cambios esenciales en la tasación del depósito, donde una buena elección de estos parámetros (ley de corte, tasas de extracción y procesamiento) provoca aumentos de un 25% en el VPN y si esto se evalúa en un escenario optimista del mercado, el VPN logra incrementar hasta los 1,700 MUS\$, lo que representa sobre un 50% de mejora en el proyecto. Al contrario, una incorrecta elección de la combinación de estos parámetros puede desencadenar disminuciones de más de 350 MUS\$, reduciendo el valor en un 35% en comparación con el caso base. Además, encontrarse en escenarios pesimistas del precio del cobre, rebajan aún

más esta valorización, llegando a obtener menos de 300 MUS\$ (baja de un 73% del VPN). Incluso, evaluar esta combinación en un escenario que contemple precios bajos y costos altos, puede decaer el VPN hasta 90 MUS\$, generando que el proyecto sea mínimamente rentable. Es más, si se evalúa bajo este mismo escenario pesimista, la mejor opción de escala de producción, el valor del proyecto logra aminorarse cerca de un 20%, que equivale a un descenso de aproximadamente 250 MUS\$, lo que es muy inferior con las cifras que entregan una mala combinación de variables de diseño.

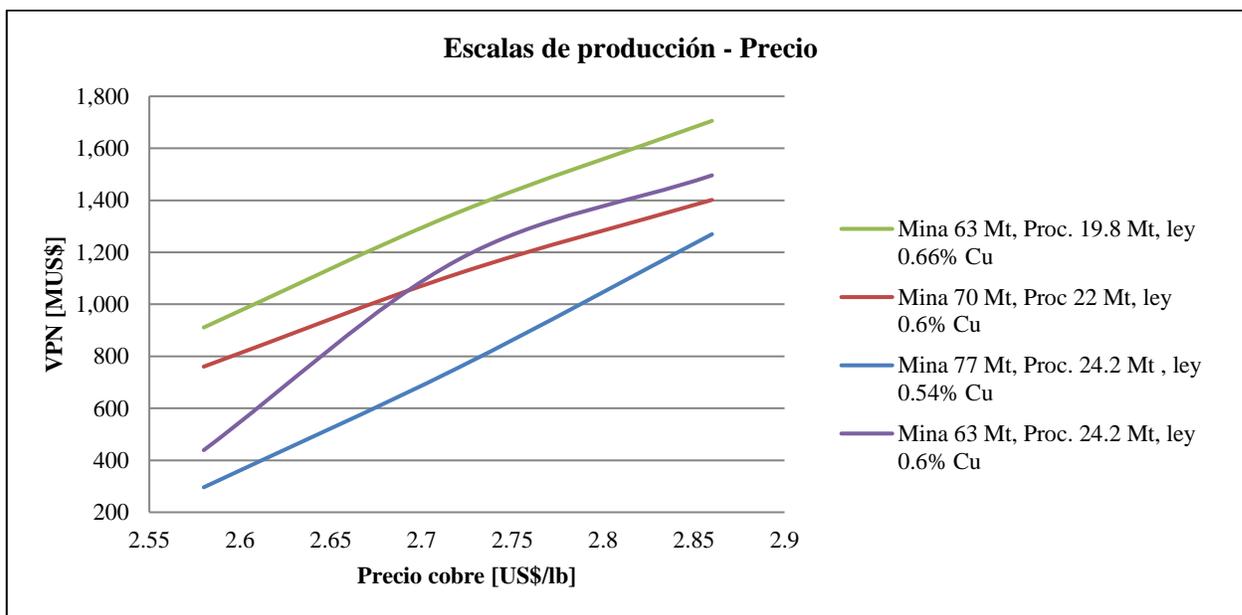


Figura 4-22. Variación del VPN según escalas de producción

Los cambios en las escalas de producción no solo afectan a nivel global, sino que perturban los planes de producción a escala local, en los cuales la selección y tamaño de fases se ve alterado; en la Tabla 4-5 se muestran las variaciones de tonelajes de cada diseño, donde se observa claramente que el diseño 4 es el que posee menor beneficio económico, en cual el SR de las distintas fases es muy cambiante, siendo inferior a 1 para la fase dos y superior a 5 para la última fase, mientras que para los otros diseños estos valores son más uniformes. Junto con esto, se aprecia que el diseño 4 posee mayor cantidad de estéril, en desmedro de los diseños 2 y 3 (diferencias cercanas a las 400 [Mt] de estéril), esto principalmente al cambio de ley mínima de entrada a proceso, lo que hace que la mayor cantidad de fino recuperado del diseño 4 produzca beneficios marginales. Los diseños 2 y 3 son los que generan mayor VPN, los cuales ostentan indicadores económicos y razón estéril mineral similares, pero difieren drásticamente en la vida útil que poseen, alcanzando una diferencia de cinco años entre los dos.

Es necesario recalcar que la inversión realizada depende principalmente de la capacidad de procesamiento y en menor medida de la tasa de minado, es por esto que el indicador IVAN puede variar y hacer que un proyecto que posee menor VPN sea más atractivo que otro; para las escalas evaluadas, coinciden que los diseños que generan mayor ingreso poseen un IVAN alto, pero si se observa la Figura 4-23, se distingue con puntos rojos los proyectos con mayor VPN, que no necesariamente coinciden con el mejor indicador estudiado, esto se da por el gran aumento en la tasa de minado que genera menor ingreso.

**Tabla 4-5. Resultados Escalas de producción**

Diseños	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Capacidad mina [Mt/año]	70	70	63	77
Capacidad Planta [Mt/año]	22	22	19.8	24.2
Ley de corte	0.60%	0.66%	0.66%	0.54%
Fino Recuperado [Mt]	685.7	618.5	613.4	689.4
Estéril Total [Mt]	2,008.9	1,722.6	1,724.7	2,141.8
<b>SR</b>	<b>1.92</b>	<b>1.89</b>	<b>1.89</b>	<b>1.95</b>
Estéril Fase 1 [Mt]	99.0	92.3	81.4	133.1
Mineral Fase 1 [Mt]	74.9	68.1	65.2	82.7
<b>SR Fase 1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1.6</b>
Estéril Fase 2 [Mt]	240.1	212.8	195.4	189.4
Mineral Fase 2 [Mt]	173.5	130.2	154.2	222.3
<b>SR Fase 2</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.3</b>	<b>0.9</b>
Estéril Fase 3 [Mt]	408.5	286.5	311.4	487.4
Mineral Fase 3 [Mt]	192.5	153.2	152.9	243.3
<b>SR Fase 3</b>	<b>2.1</b>	<b>1.9</b>	<b>2.0</b>	<b>2.0</b>
Estéril Fase 4 [Mt]	337.4	244.6	249.1	429.9
Mineral Fase 4 [Mt]	144.7	111.9	112.5	124.6
<b>SR Fase 4</b>	<b>2.3</b>	<b>2.2</b>	<b>2.2</b>	<b>3.5</b>
Estéril Fase 5 [Mt]	268.5	364.1	351.0	311.0
Mineral Fase 5 [Mt]	134.4	150.5	165.4	175.9
<b>SR Fase 5</b>	<b>2.0</b>	<b>2.4</b>	<b>2.1</b>	<b>1.8</b>
Estéril Fase 6 [Mt]	655.5	522.2	536.4	591.0
Mineral Fase 6 [Mt]	172.3	143.5	135.6	111.4
<b>SR Fase 6</b>	<b>3.8</b>	<b>3.6</b>	<b>4.0</b>	<b>5.3</b>
<b>LOM [años]</b>	<b>48.6</b>	<b>42.6</b>	<b>47.1</b>	<b>46.4</b>
<b>Payback [años]</b>	<b>7.9</b>	<b>7.7</b>	<b>7.1</b>	<b>8.75</b>
<b>TIR [%]</b>	<b>13.4</b>	<b>14</b>	<b>14.7</b>	<b>12.1</b>
<b>IVAN</b>	<b>1.6</b>	<b>1.9</b>	<b>2.0</b>	<b>1.1</b>
<b>VPN [MUS\$]</b>	<b>1,118.0</b>	<b>1,322.0</b>	<b>1,352.9</b>	<b>755.4</b>

Cabe mencionar que se estudian las diversas combinaciones posibles de las escalas de producción, donde existen diferencias notables entre los casos, existiendo diseños que no flotan para leyes de corte inferiores a 0.4%, esto se explica por los cambios entre las tasas de explotación y de procesamiento que no permiten realizar un plan balanceado para la vida completa de la mina, las diferentes alternativas de diseños se muestran en anexos.

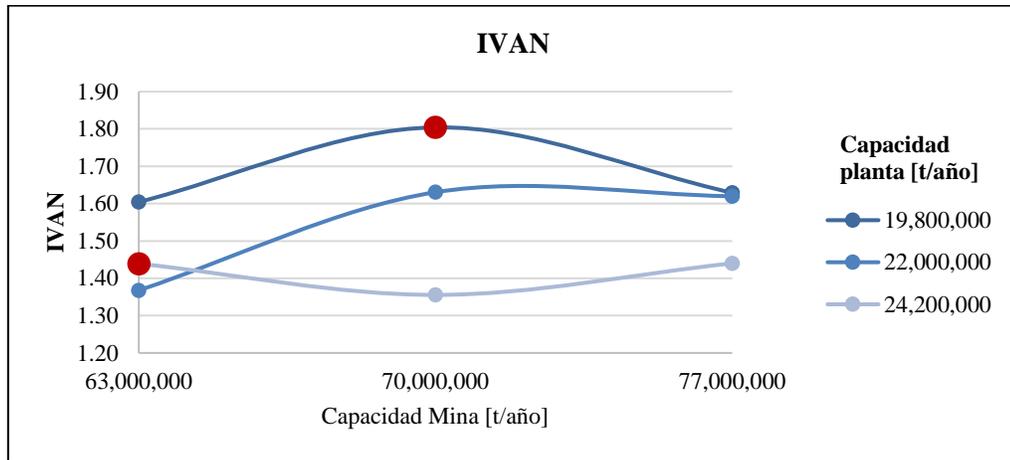


Figura 4-23. IVAN

Tomando en cuenta la interdependencia de los parámetros de planificación, la mayor influencia viene dada por escenarios positivos del precio y de recuperación, donde el VPN logra incrementarse sobre un 45%, también el efecto de ángulo-precio genera mayores beneficios que una mejora en la ley de corte, ya que la valorización del proyecto puede acrecentarse en un 39%. Un aumento en el costo y la capacidad de procesamiento puede reducir el VPN hasta los 800 MUS\$, una cifra significativa, ya que se rebaja un cuarto el monto comparando con el caso base del proyecto; por su lado, un alza en los costos y tasa de minado también impacta negativamente en el VPN, pero en menor escala, modificando en -15% el beneficio obtenido del proyecto. Además, elevar la escala de producción, descende el VPN en un 13%, pero este valor también es afectado por una inversión más alta, que considera estos dos parámetros para su formulación. La Figura 4-24 muestra las incidencias del ascenso, en distintas combinaciones, de las variables sensibilizadas.

Si se estudian escenarios pesimistas de todos los criterios utilizados en la evaluación y planificación del proyecto, las áreas que mayor repercuten en una baja de la valorización del plan es la incertidumbre de mercado y costos (43%), seguido por las escalas de producción con un 34%, más atrás quedan la metalurgia (14%), estimación (4%) y geomecánica (3%).

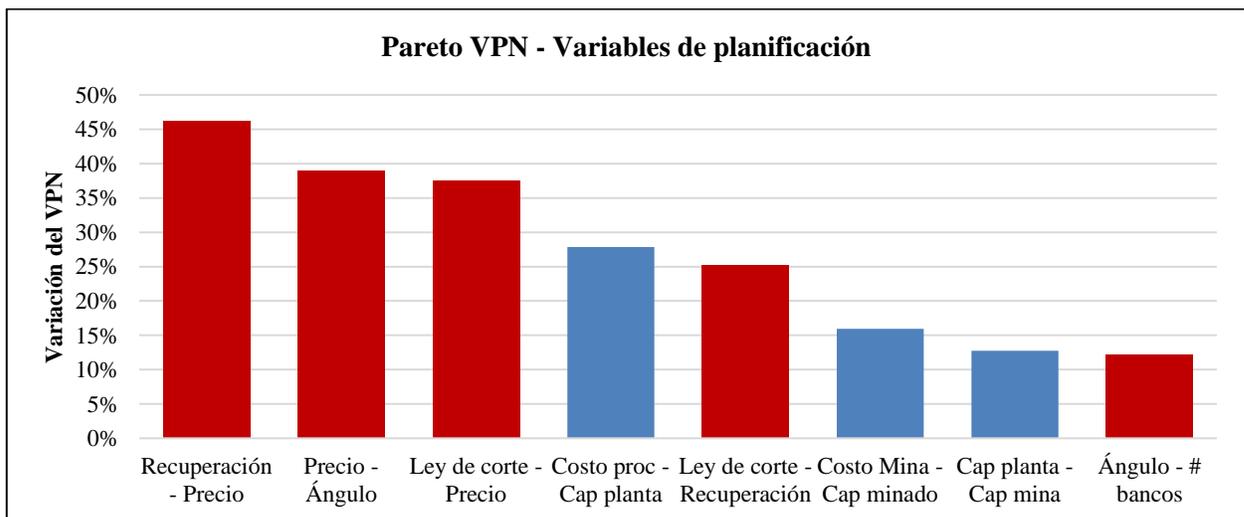


Figura 4-24 . Pareto interdependencia de variables de planificación

## 5. CASO 2: MODELO 02

### 5.1. Modelo Base

#### 5.1.1. Estimación de recursos

El modelo considerado es un yacimiento de minerales de cobre y oro, donde se distingue una unidad de estimación para el estudio y se toma en cuenta que la totalidad del mineral es del tipo sulfuro. A partir de esto, se genera el mapa variográfico y el variograma experimental del mineral de cobre de los datos entregados.

En la etapa de estimación de recursos se obtiene el variograma modelado para el cobre, utilizando un modelo esférico que consta de un efecto pepita de 0.03, con una estructura con meseta de 0.8 y un alcance de 100 metros. El *kriging* ordinario, se realiza a partir de 3 a 15 muestras como mínimo y máximo. A continuación, se señalan las variaciones realizadas de cada parámetro, admitiendo tres valores para cada uno de estos.

Tabla 5-1. Parámetros de la estimación de recursos

Parámetro	Variación Negativa	Caso Base	Variación Positiva
Efecto pepita	0.024	0.03	0.036
Alcance [m]	80	100	120
Número de muestras	12	15	18

Se establecen variaciones de 20% de cada uno de los parámetros, esto considerando que el porcentaje se encuentra dentro del rango aceptable en la definición de la estimación de recursos. Bajo esto, se tiene que el efecto pepita puede ser modificado entre  $\pm 20\%$ ; ya que es un valor que es estimado a partir de datos espaciados, como se menciona para el caso anterior, existen pequeñas desviaciones en el valor del efecto, por lo que se instauran cambios de esta magnitud. El número de muestras escogida se decreta en 15, con las variaciones se estima cuanto influye tolerar un mayor o menor número de estas en la definición del *kriging* ordinario.

Si se establecen estos rangos de estimación, se generan 27 modelos de bloques tomando en cuenta todas las combinaciones posibles. Los bloques del modelo poseen dimensiones de 20x20x15 metros y este posee un tamaño aproximado de 3,900 metros en dirección Norte-Sur, 3,500 en dirección E-O y una elevación superior a un kilómetro.

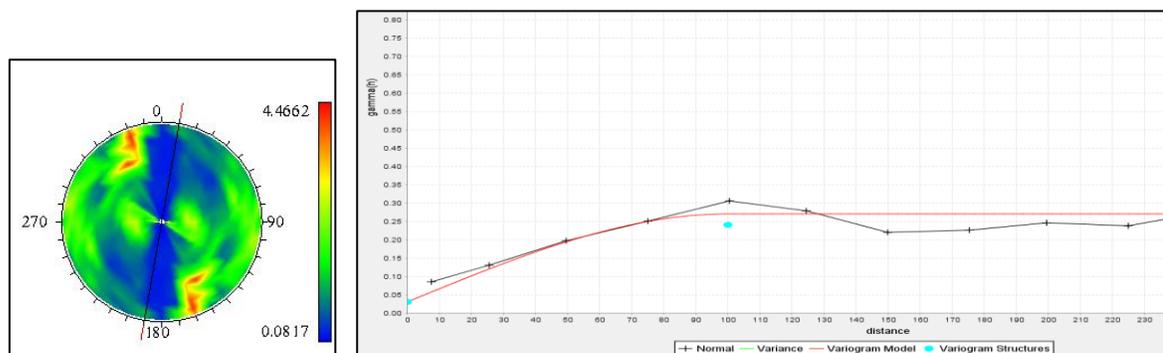


Figura 5-1. Izquierda: Mapa Variográfico. Derecha: Variograma modelado

### 5.1.2. Análisis Geoestadístico de datos

La creación del modelo base, permite establecer la curva tonelaje-ley del depósito. La Figura 5-2 muestra la curva tonelaje-ley del modelo base estudiado, con esta es posible realizar el estudio posterior para fijar la ley de corte a utilizar. Se puede apreciar, por ejemplo, que a ley de corte 0.4% se posee cerca de 2,000 millones de toneladas en el yacimiento, con una ley promedio superior a 0.5%, cabe mencionar que este gráfico representa el depósito completo y no necesariamente serán las reservas explotables para el plan de producción. Además, se observa que existe gran cantidad de mineral que está bajo una ley 0.2% que no es económicamente rentable.

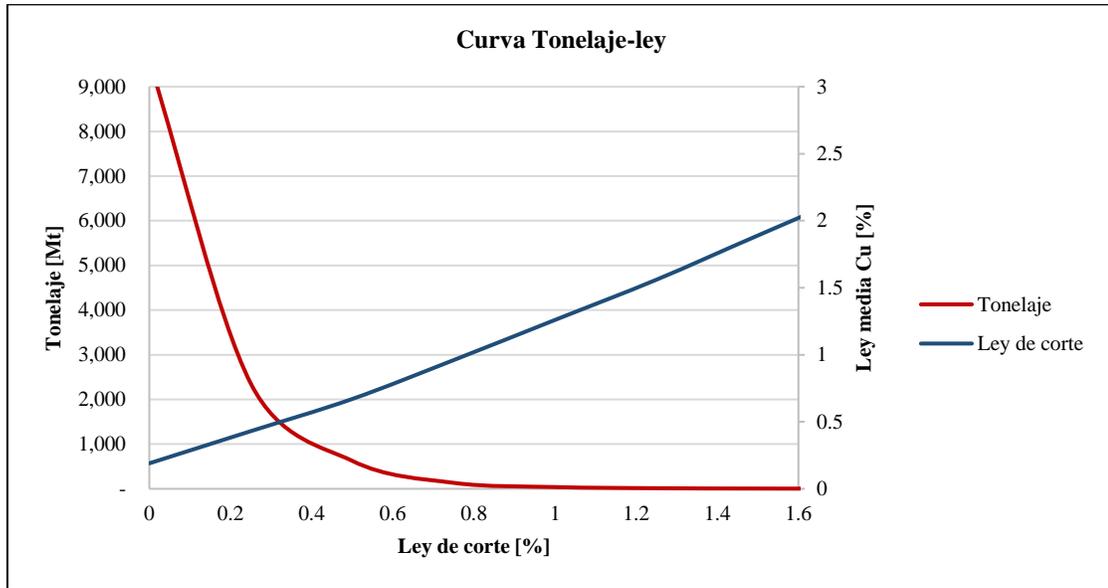


Figura 5-2. Curva Tonelaje - Ley del Modelo 02

El tonelaje presente en la unidad de estimación establecida asciende cercano de los 5,800 millones de toneladas, que representa aproximadamente la mitad del tonelaje expuesto en el modelo de bloques del depósito. Además, posee una ley media de cobre de 0.24% y una ley de oro de 0.08 ppm (Tabla 5-2).

Tabla 5-2. Estadísticas básicas modelo 02

Mineral [Mt]	Ley media Cu [%]	Ley máx. Cu [%]	Fino Cu [Mt]	Ley media Au [ppm]	Ley máx. Au [ppm]	Fino Au [Mt]
5,820	0.24	5.1	1,388	0.08	0.51	112

### 5.1.3. Planificación

Para el segundo caso de estudio se ejecutan condiciones similares al primer análisis. Inicialmente, se rebloquea el modelo para obtener bloques de 40x40x15 y se define la misma metodología para la creación de los *pits* anidados. La planificación se lleva a cabo considerando los parámetros de la Tabla 5-3, donde el caso base es el empleado para la creación inicial del *pit* final y de las fases preliminares operativas. Estas variaciones producen la misma cantidad de potenciales escenarios de planificación que en el primer caso de estudio.

**Tabla 5-3. Parámetros utilizados en la metodología de sensibilización**

Parámetro	Variación Negativa	Caso Base	Variación Positiva
<b>Ángulo [°]</b>	47	49	51
<b>Número bancos</b>	8	12	16
<b>Recuperación [%]</b>	87	89	91
<b>Ley de corte [%]</b>	0.45	0.5	0.55
<b>Costo planta [US\$/t]</b>	9.5	10	10.5
<b>Costo mina [US\$/t]</b>	1.8	1.9	2
<b>Precio cobre [US\$/lb]</b>	2.58	2.72	2.86
<b>Capacidad planta [t/año]</b>	12,000,000	13,500,000	15,000,000
<b>Capacidad mina [t/año]</b>	54,000,000	60,000,000	66,000,000

El ángulo base escogido es de 49°, para realizar perturbaciones que oscilan entre  $\pm 5\%$ , para no considerar un ángulo que exceda los rangos comunes de las faenas, a su vez, admitir ángulos inferiores a 45° es demasiado conservador y produce una gran disminución de la valorización del proyecto (siguiendo la lógica utilizada en el caso preliminar). El número de bancos y sus variaciones son los mismos que para el primer caso. Para los parámetros del mercado (precio y costos) se aplican alteraciones iguales a las anteriores, lo mismo se emplea para la recuperación metalúrgica establecida.

Al tener una ley de corte marginal baja en el depósito, se realiza un análisis para leyes de corte superiores que generen mayores beneficios económicos. Donde la ley mínima de entrada a proceso se centra en 0.6%, y se aplican modificaciones del  $\pm 10\%$ . Inicialmente, las tasas de extracción y procesamiento se fijan en 70 y 20 millones de toneladas anuales, las cuales permiten construir un plan de producción estable, para el cual es posible analizar y generar variaciones comprensibles posteriormente. Para establecer el *pit* final operativo y las fases óptimas preliminares, se emplea el caso base descrito anteriormente. De igual manera que el caso preliminar, se considera el uso de pilas de *stock* para realizar la planificación, estableciendo un límite físico del acopio de 100 millones de toneladas. Además, se aprovechan los parámetros técnico-económicos de la Tabla 5-4 para complementar el estudio, cabe mencionar que estos no entran en las sensibilizaciones realizadas.

**Tabla 5-4. Otros parámetros planificación**

Parámetro	Valor
<b>Precio oro [US\$/toz]</b>	1500
<b>Costo venta oro [US\$/toz]</b>	400
<b>Costo venta cobre [US\$/lb]</b>	0.3
<b>Tasa de descuento [%]</b>	10

Primero se debe trazar el escenario base de planificación, para comprender el efecto en la variación de los parámetros. En la Figura 5-3 se muestra el tonelaje estéril y mineral perteneciente a cada *pit* anidado, así se establecen las distintas fases que serán operativizadas. Se obtienen cinco fases preliminares, considerando como *pit* final el que contiene cerca de un 80% del tonelaje final.

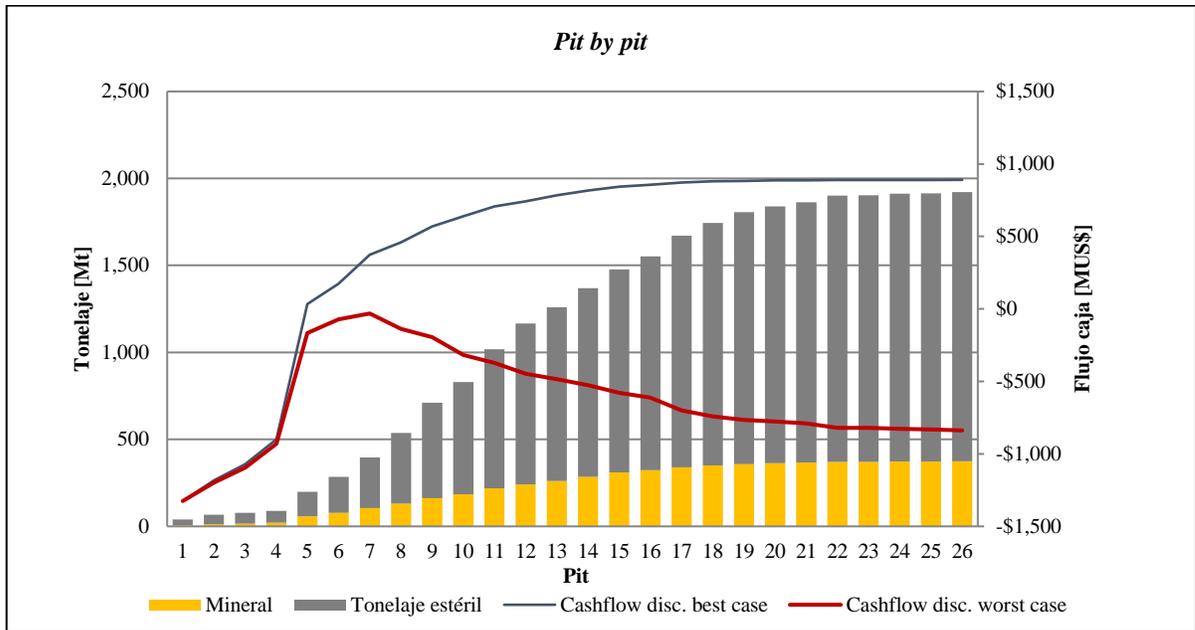


Figura 5-3. Gráfico *pit by pit* modelo 02

La dirección de los *pits* anidados es escogida por la metodología mencionada anteriormente y poseen una orientación hacia el sur, donde se selecciona un set de cinco fases, las cuales se muestran en la Figura 5-4 y donde las dos primeras fases poseen un tonelaje similar y la razón estéril-mineral va aumentando hacia las fases cuatro y cinco, llegando hasta un valor de 7 para esta última, ya que posee una menor cantidad de mineral a extraer (cerca de 400 millones de toneladas).

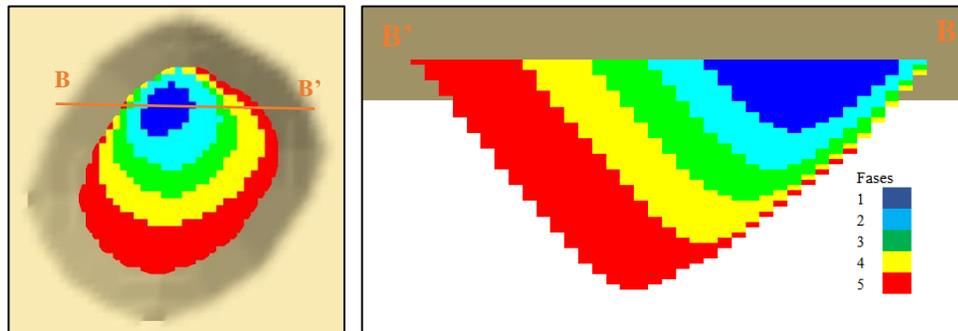


Figura 5-4. Fases del Modelo 02

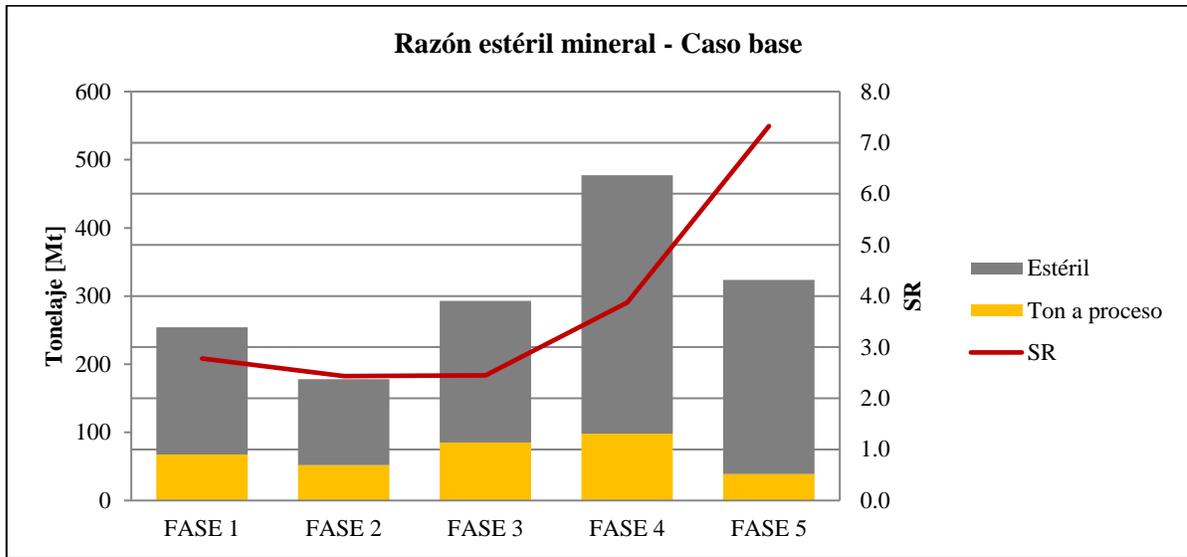


Figura 5-5. Razón estéril mineral por fases. Caso Base

El resultado del caso base y primer plan a analizar se muestra en la Figura 5-6 donde se aprecia una vida de aproximadamente 37 años, considerando dos años de *prestripping*, los últimos años de la mina es donde se utiliza casi la totalidad del acopio reservado los primeros años. El VPN es de aproximadamente 796 MUS\$, con una TIR de 16% y un *payback* de 5.4 años. Además, se estima una razón estéril-mineral de 2.7 a nivel mina.

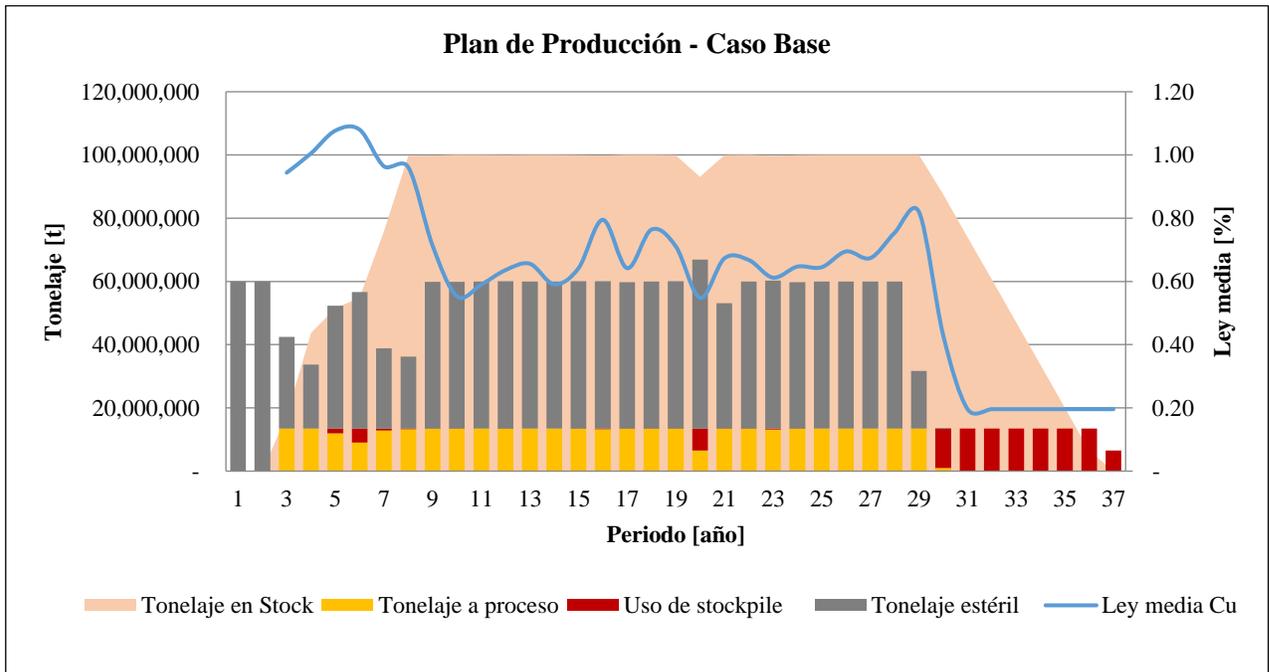


Figura 5-6. Plan de producción - Caso Base

## 5.2. Resultados MODELO 02

En la estimación de recursos, se generan los modelos de bloques a partir de las distintas iteraciones realizadas, la Figura 5-7 muestra una visualización en planta de tres sensibilizaciones de los modelos de bloques, donde se percibe que variaciones pequeñas en los parámetros mencionados, producen cambios apreciables en el modelo de bloques y en la distribución de leyes.

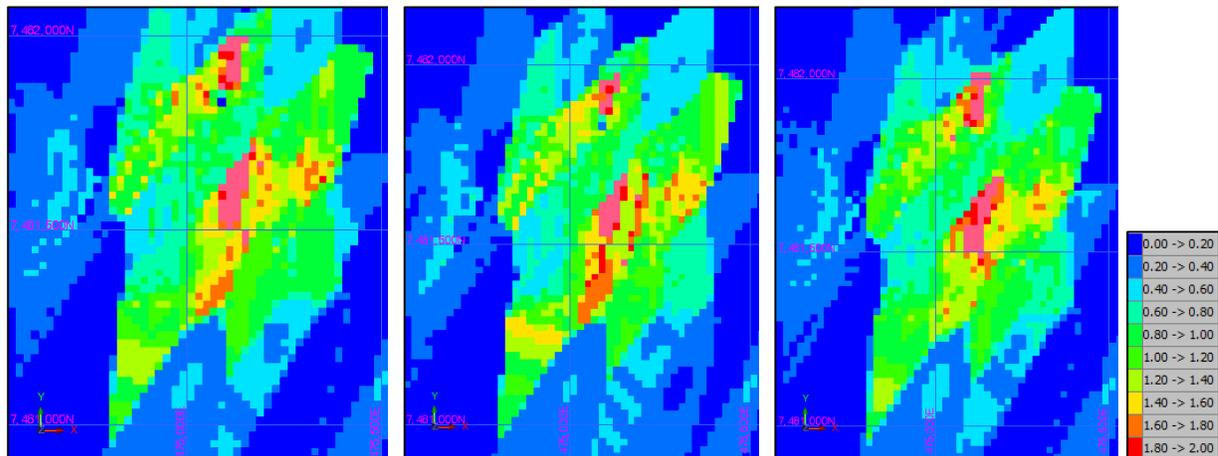
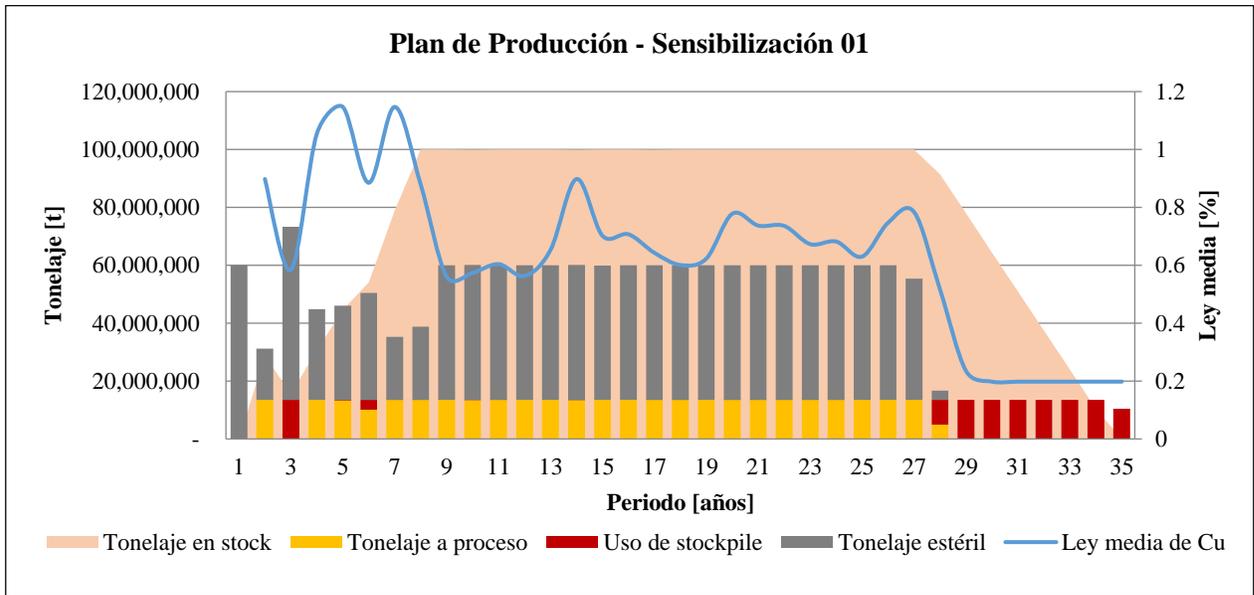


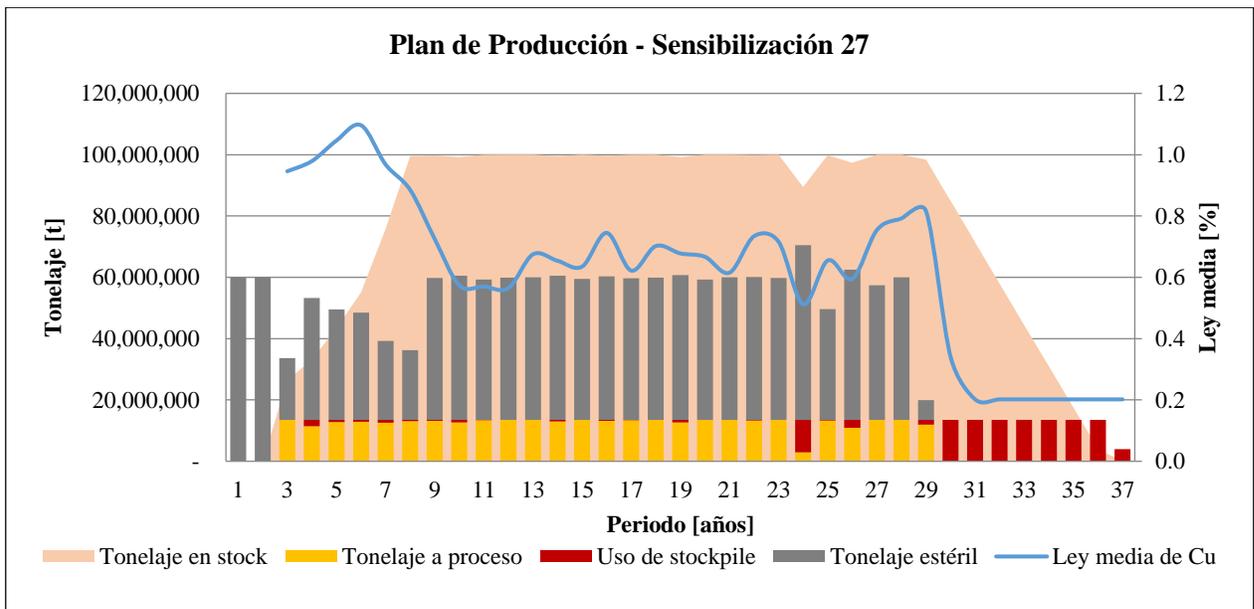
Figura 5-7. Sensibilizaciones del kriging ordinario. Izquierda: Modelo base. Centro: Pepita 0.024, alcance 80, número muestras 12. Derecha: Pepita 0.036, alcance 120, número muestras 18

Junto con esto, se establecen claras diferencias en la posterior planificación de estos modelos, ya que, al variar la distribución de leyes, cambia el secuenciamiento del plan. En específico, se modifica el mineral que entra a proceso, generando diferencias notorias en los periodos donde se usan pilas de *stock* y en la cantidad de mineral a procesar proveniente de esto. Si se observan las Figuras 5-6 y 5-8 es posible apreciar cambios esenciales en los planes de las distintas sensibilizaciones estudiadas, en efecto, para la sensibilización 01, correspondiente a transformaciones de -20% en factores de estimación, el *prestripping* es inferior al caso base, manteniendo leves diferencias en las leyes medias anuales, pero además se sugiere que para el tercer año no existe alimentación directa de la operación, sino que la planta es llenada solo por mineral proveniente del acopio.

Además, en las Figuras 5-8 y 5-9 se advierten alteraciones para las sensibilizaciones 01 y 27, esta última correspondiente a variaciones de +20% en los parámetros de estimación. Estos cambios se reflejan en la ley media de los primeros años, la diferencia en dos años de la vida útil de la faena, como también en la distribución y uso de las pilas de *stock*. Esto impacta directamente en la valorización del proyecto, ya que es sumamente necesario determinar con claridad la utilización óptima del *stock*, debido a que incrementa el valor de manera fundamental.



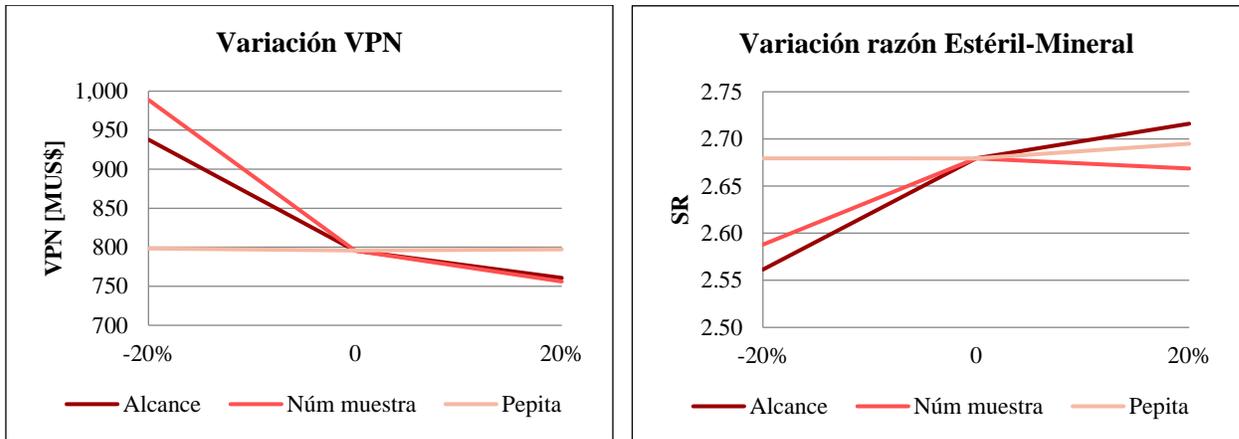
**Figura 5-8. Plan de Producción - Sensibilización 01**



**Figura 5-9. Plan de Producción - Sensibilización 27**

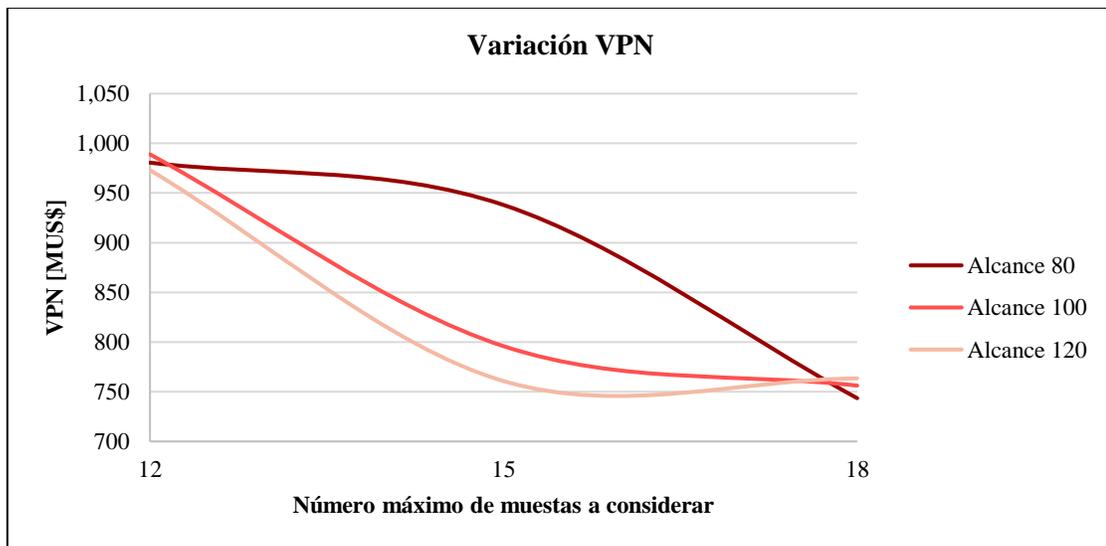
Como se distingue, considerar variaciones del  $\pm 20\%$  en los distintos parámetros de la estimación de recursos, el plan puede ser afectado cerca de un 30% en su valorización económica. Si es contemplado sólo el número de muestras que es utilizada en la estimación, la falta de información asociada a tener menor cantidad de estas provoca una sobre estimación del 25% del VPN (sumado a un incremento del 7% en la varianza del kriging), logrando una ganancia cercana a los 1,000 MUS\$ (Figura 5-10. Izquierda), lo contrario ocurre al disponer de una mayor cantidad de muestras; el beneficio económico desciende cerca de un 10%. En concordancia con esto, los métodos de clasificación de recursos no incorporan la cantidad máxima empleada en la estimación, por lo que una baja información en este parámetro puede afectar directamente dicha clasificación de recursos, donde aumenta la cantidad de mineral inferido, en desmedro de poseer más información, donde el mineral es considerado indicado o medido. Entonces, la sobre estimación de un proyecto queda

sujeta a la clasificación que se tenga de estos recursos. Esta sobre estimación del valor del proyecto se observa en distintos casos, la Figura 5-10. Izquierda exhibe que, para distintos alcances del variograma, la tendencia es similar, donde el poseer menor información aumenta el valor del proyecto.



**Figura 5-10. Sensibilización de variables de estimación. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en SR**

Si el proyecto aumenta su VPN, la razón estéril-mineral baja drásticamente; en particular, un descenso en el alcance del variograma, provoca que esta razón vea afectada en un -5%, como se presenta en la Figura 5-10. Derecha. Considerando solo los parámetros del modelo variográfico (Figura 5-11), disminuciones de un 20% en ambos, provocan que la valorización económica del plan crezca en un 18%, lo que puede llegar a ser contra intuitivo, pero si el alcance utilizado se reduce, la dilución existente decrece, mejorando porcentualmente las leyes en el depósito.



**Figura 5-11. Sensibilización modelo variográfico. Impacto en el VPN**

Estudiando los cambios en el *pit* final, se observa que un menor alcance del variograma produce una disminución del tonelaje de la envolvente económica, de similar manera ocurre para una menor cantidad de muestras en el estudio; ambos parámetros reducen sobre un 5% el tamaño del *pit* final, lo que se traduce en un decaimiento de cerca de 100 millones de toneladas (Figura 5-12).

Los gráficos representados en la Figura 5-13 muestran el nivel de coincidencia de los *pits*, ya que dos sensibilizaciones distintas pueden tener similares tonelajes y tamaños, pero no necesariamente poseen la misma forma o consideran los mismos bloques para la envolvente económica seleccionada. Es posible apreciar que existe una gran cantidad de bloques se encuentran dentro del *pit* final del modelo base y que se ubican fuera de este en el modelo con sensibilización negativa de los parámetros de estimación, en específico, existen cerca de 90 [Mt] que se localizan en este contexto, pero existen sobre 2 millones de toneladas que están en la situación contraria (dentro del *pit* de la sensibilización 01 y fuera del modelo base). En la Figura del centro es posible observar un alto nivel de coincidencia entre las sensibilizaciones 27 (cambios positivos) y el modelo base. La mayor alteración se advierte entre los modelos 01 y 27, donde existen cerca de 90 millones de toneladas que pertenecen al *pit* de la sensibilización 27 y no al 01, mientras que sobre 15 millones de toneladas se ubican en el *pit* de la sensibilización 01 y no dentro del modelo 27.

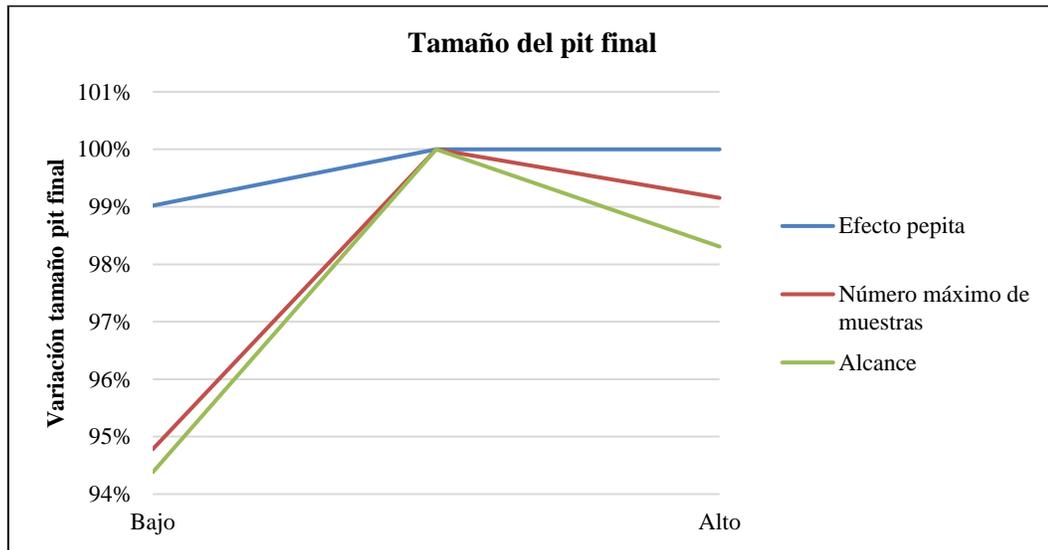


Figura 5-12. Sensibilización en el tamaño del *pit* final

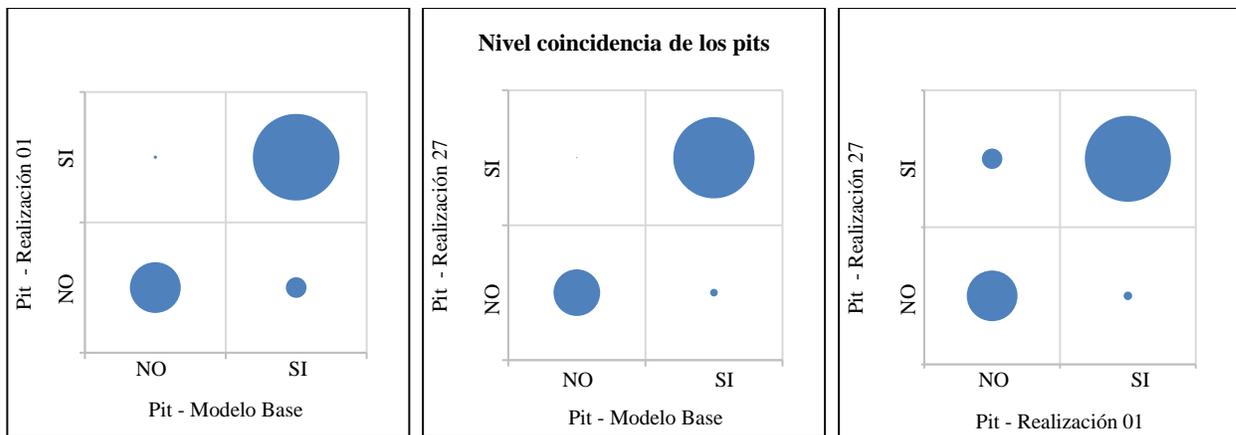


Figura 5-13. Nivel de coincidencia de los *pits* generados por la estimación de los recursos. Izquierda: Modelo Base y Sensibilización 01. Central: Modelo Base y Sensibilización 27. Derecha: Sensibilización 01 y Sensibilización 27

### 5.2.1. Planificación

Al realizar las corridas con los diferentes planes, se establecen múltiples escenarios que varían enormemente la valorización del plan de producción del yacimiento. En la Figura 5-14 se muestra una distribución normal del VPN en los múltiples escenarios, cabe mencionar que cerca de un tercio de la totalidad de escenarios presenta variaciones menores al  $\pm 20\%$  en comparación con el caso base, pero existe un número considerable de escenarios donde la valorización del proyecto se reduce a más de la mitad. La distribución de los otros indicadores se encuentra en anexos, donde se puede rescatar que existen planes que difieren por más de 15 años de vida útil de la faena para escenarios distintos.

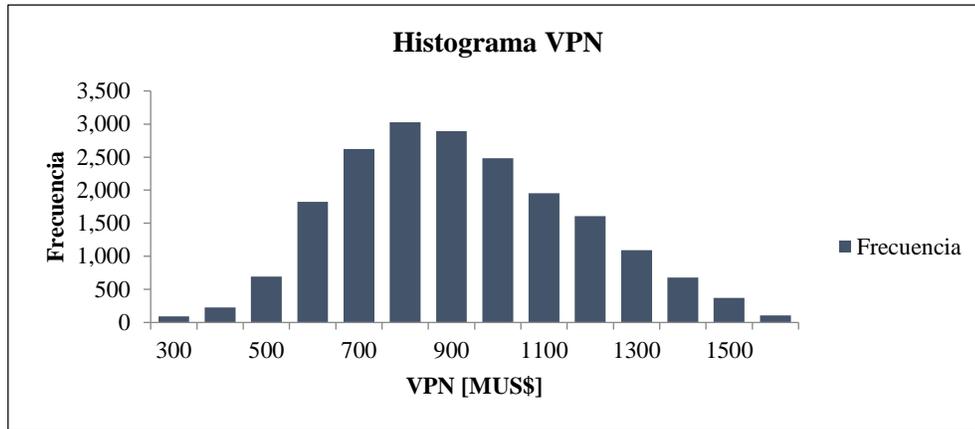


Figura 5-14. Histograma VPN Modelo 02

Inicialmente se compara la incidencia de los factores en los distintos componentes de control, así se tiene que la Figura 5-15 muestra el comportamiento en el VPN del proyecto, de los parámetros que son utilizados en la planificación, donde destaca que variaciones positivas del precio y ley de corte mejoran en gran medida la valorización del plan. Mientras que aumentar la tasa de minado provoca un decrecimiento en el VPN (17%), junto con esto, incrementos en valores como costos de procesamiento y minado, número de bancos a considerar y capacidad de planta provocan efectos negativos en el VPN.

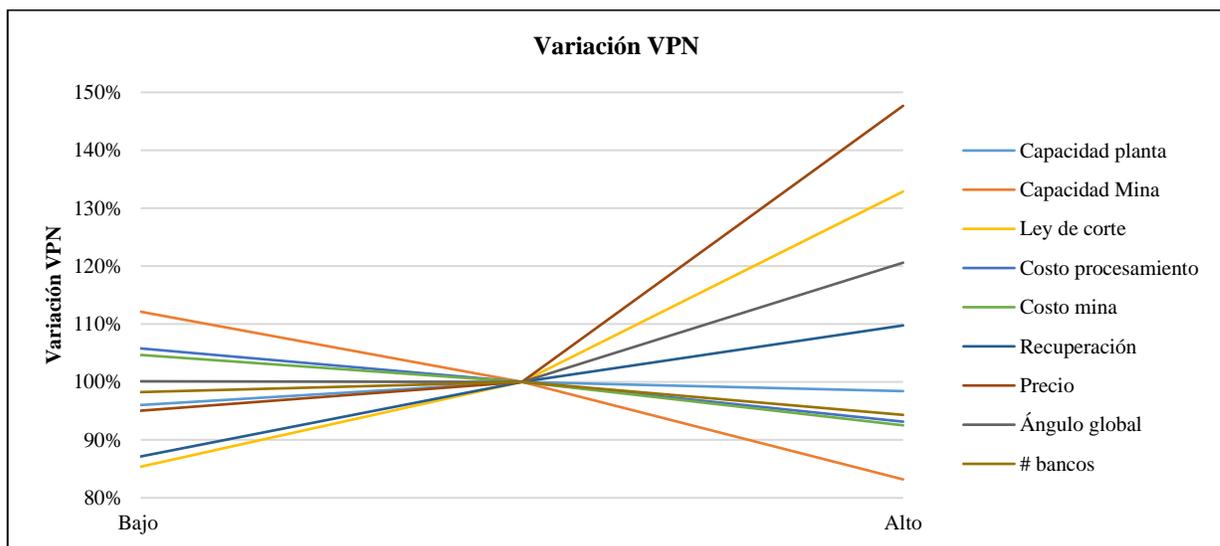
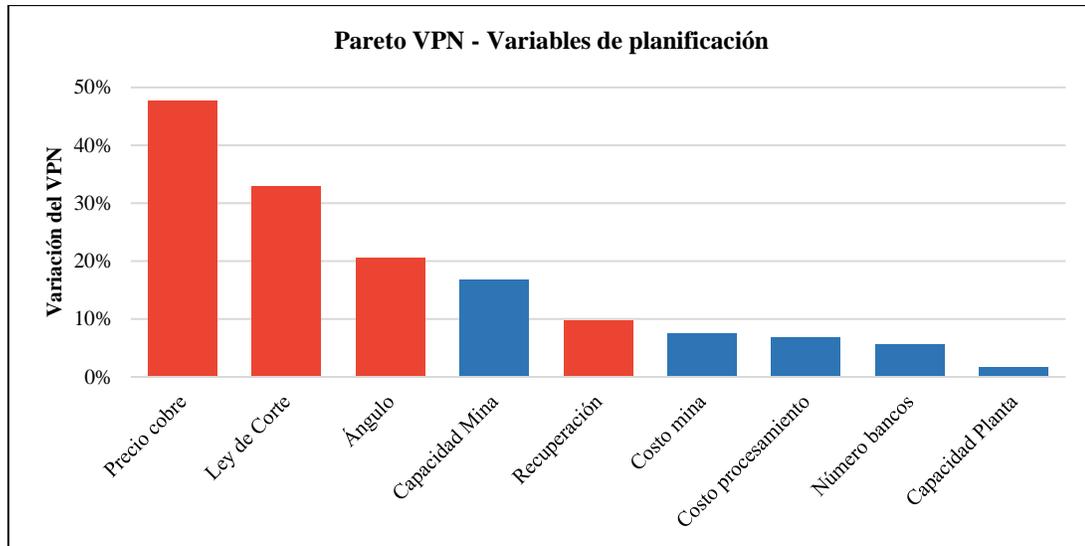


Figura 5-15. Sensibilización en el VPN

En la Figura 5-16 se aprecian las distintas incidencias de los parámetros sensibilizados (incremento de estos), donde en rojo se observa un efecto positivo (aumento del VPN) y en azul uno negativo (disminución del valor de este indicador). Destaca claramente la mayor incidencia del precio del cobre (48%) y ley de corte (33%), además, se nota que, al tener mayor capacidad de minado, el VPN del proyecto decae en al menos un 15%. En el gráfico se comprueba que la capacidad de procesamiento no genera mayor variación en esta etapa de evaluación, esto se debe principalmente a que el caso base considera la mejor capacidad de tratamiento en términos de beneficio económico. Además, se percibe una incidencia negativa del 7% de los costos (por separado) utilizados en la etapa.



**Figura 5-16. Pareto variables planificación. Impacto en VPN**

Existen indicadores técnicos que son relevantes según los distintos objetivos planteados por la compañía mandante, donde las decisiones también dependen de estos factores, por lo tanto, es necesario realizar las sensibilizaciones de estos. Con respecto a la vida útil de la mina, un aumento en la ley de corte y capacidad de extracción pueden provocar disminuciones del orden del 8 al 10% del caso base en términos de este factor (Figura 5-17. Izquierda). Otro indicador importante es la razón estéril mineral, donde el crecimiento porcentual de la tasa de minado incrementa esta razón sobre un 12%, mientras que la misma alza porcentual en la tasa de procesamiento reduce esta razón en un 10%. El aumento en la razón estéril minera dependiente de la tasa de extracción es concordante con lo mencionado anteriormente, donde el elevar esta genera un descenso económico del proyecto, debido a que se posee mayor cantidad de estéril por mineral extraído.

Las variables que más impactan en la razón estéril mineral son las que definen la escala de producción, donde en la Figura 5-18 se observa el comportamiento de todos los parámetros de la planificación con respecto a este indicador técnico, donde además es apreciable que el ángulo utilizado también juega un rol importante en la estimación de esta razón, al aminorar en al menos un 5% el SR cuando se sube la inclinación.

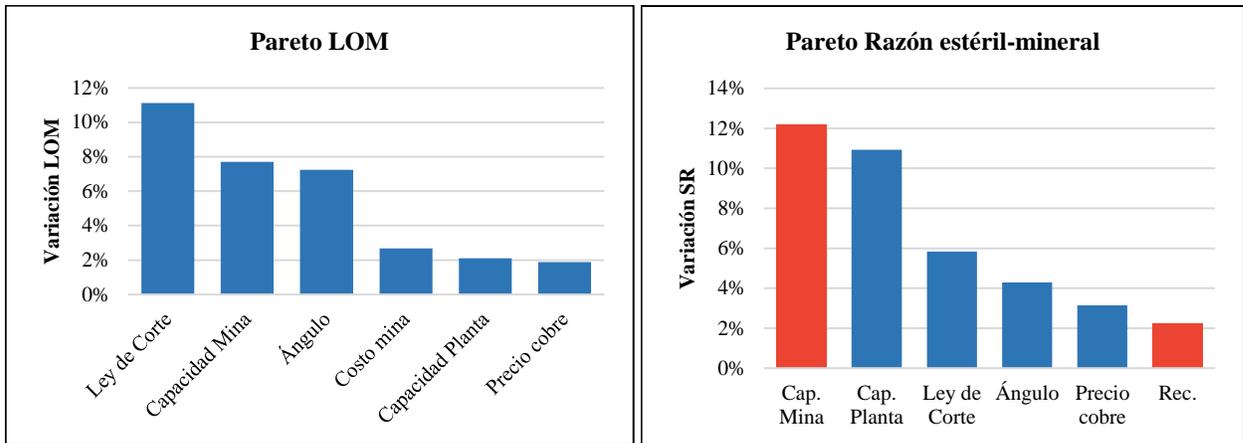


Figura 5-17. Pareto sensibilización en indicadores técnicos. Izquierda: Impacto en LOM. Derecha: Impacto en SR

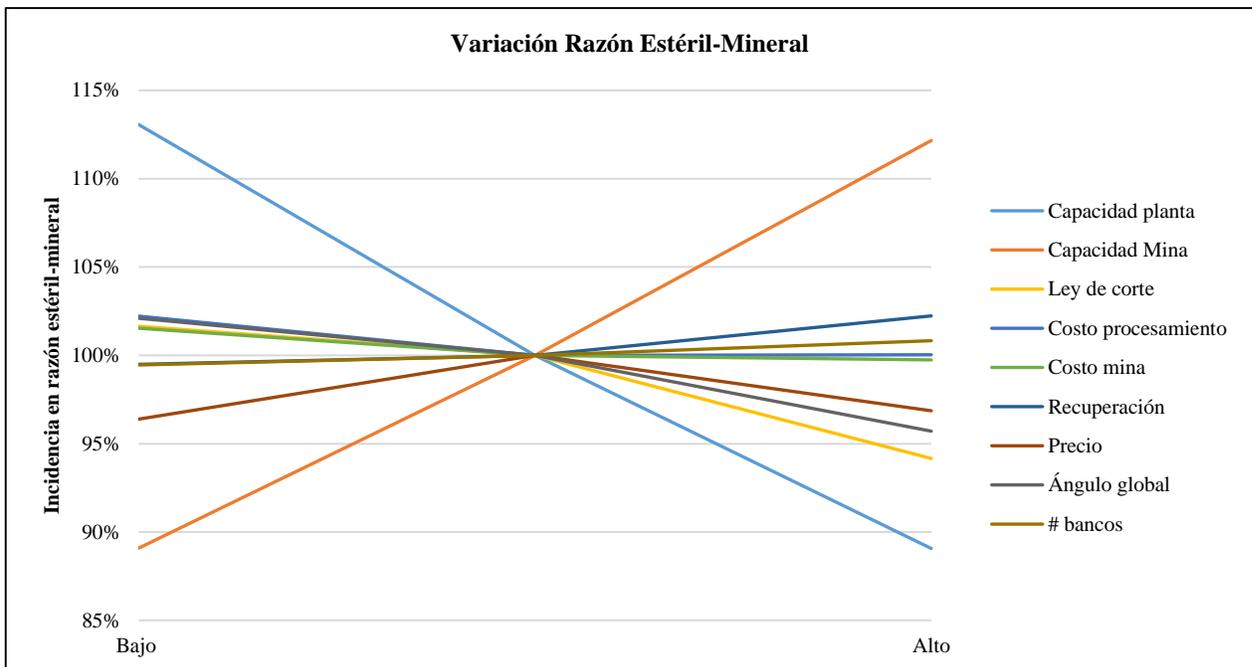


Figura 5-18. Impacto en SR

Evaluando el tamaño del *pit* final (Figura 5-19) es posible percibir que un aumento de la ley de corte rebaja en un 13% el tonelaje, que representa aproximadamente 220 millones de toneladas, a su vez el incremento del ángulo genera un decaimiento del material de la envolvente económica en un 8%, también si se establece un crecimiento conjunto de estas variables, el *pit* final se reduce en un 17%. Mientras que disminuciones del precio y del número de bancos inciden negativamente en el tamaño del *pit* (-6% y -3%, respectivamente). Las caídas de tonelaje provenientes de una mayor ley de corte y ángulos no provocan grandes efectos negativos en la valorización del proyecto, ya que, en estos mismos escenarios, el cobre que es recuperado (fino) decae en menos de un 6%, por lo que efectivamente la baja en el tonelaje del *pit*, viene dada principalmente por estéril.

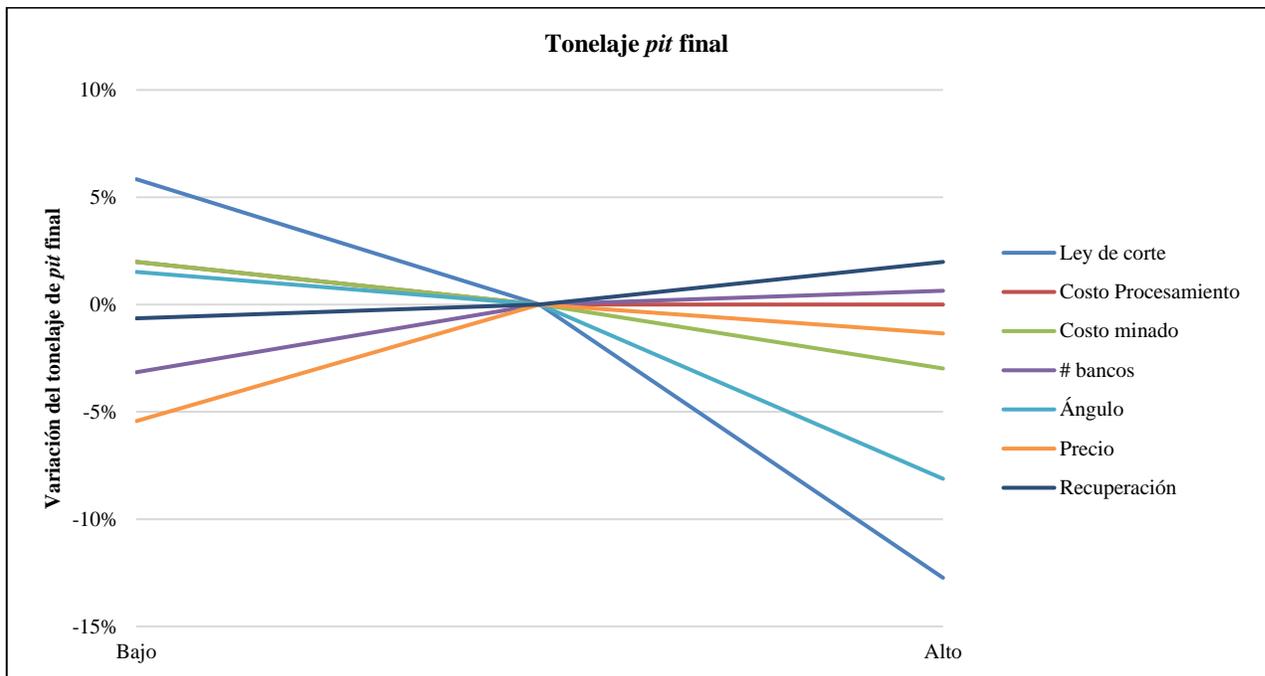


Figura 5-19. Sensibilización variables de planificación. Impacto en tonelaje *pit* final

Considerando los parámetros geomecánicos, se tiene que, en primera instancia, aumentar el ángulo del *pit* permite incrementar el beneficio económico, pero en diversos depósitos este resultado no es lineal. En este caso de estudio, se muestra que reemplazar de 47° a 49° genera utilidades marginales, mientras que al variar a 51° el VPN se eleva por sobre un 15% (Figura 5-20. Izquierda), todo depende claramente del depósito a evaluar, ya que un alza superior a los 50°, el tamaño del *pit* final crece de forma sustancial, existiendo la posibilidad de contener mayor cantidad de mineral a recuperar. Esto se explica observando el comportamiento del yacimiento, ya que, al disminuir levemente el ángulo de talud, existe la opción de que solo se incorpore estéril (o mineral de baja ley) a la envolvente económica escogida, por lo que el producto sería marginal; como se señala en la Figura 5-20. Derecha, la razón estéril mineral es muy cercana para ángulos entre 47° y 49°, pero es claramente inferior utilizando una inclinación de 51°, por lo que el beneficio económico es superior en este caso. Tomando en cuenta el número de bancos para la generación de los *pits* anidados, este es una componente que no requiere mayor estudio para su formulación, pero que provocan desviaciones del orden del 5% en la valorización del proyecto si se utiliza una menor cantidad de bancos. Por lo tanto, tener esta noción permite establecer estimaciones geomecánicas más o menos conservadoras según los requerimientos de otras áreas de la evaluación de un proyecto, que logran abordar la problemática desde una visión más global del depósito.

En concordancia con lo anterior, la Figura 5-21 muestra el beneficio económico y el cobre fino recuperado al variar los ángulos, donde se vislumbra que para ángulos inferiores a los 47° el VPN encontrado, tiene comportamiento dispar dependiendo claramente del cobre que es recuperado, mientras que, a partir de este punto, el ingreso económico es creciente y no depende directamente del cobre recuperado, ya que influye la cantidad de estéril que se esté incorporando en la extracción del mineral, además es posible observar que para un ángulo de 54° el fino decae enormemente y mantiene un VPN similar a sus adyacentes, esto se debe a la configuración en este ángulo, donde el tamaño del *pit* final es menor, incorporando menor cantidad de tonelaje estéril. Cabe mencionar que este análisis es realizado para una escala de producción distinta a la establecida como caso base, por lo que el VPN no es el del mencionado.

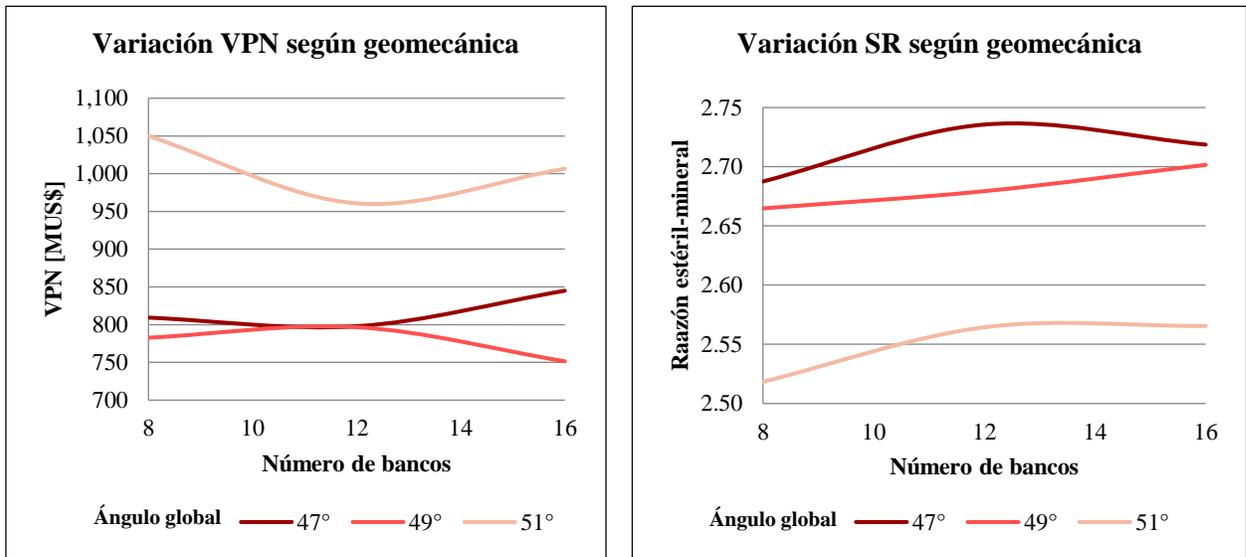


Figura 5-20. Sensibilización según geomecánica. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en razón estéril-mineral

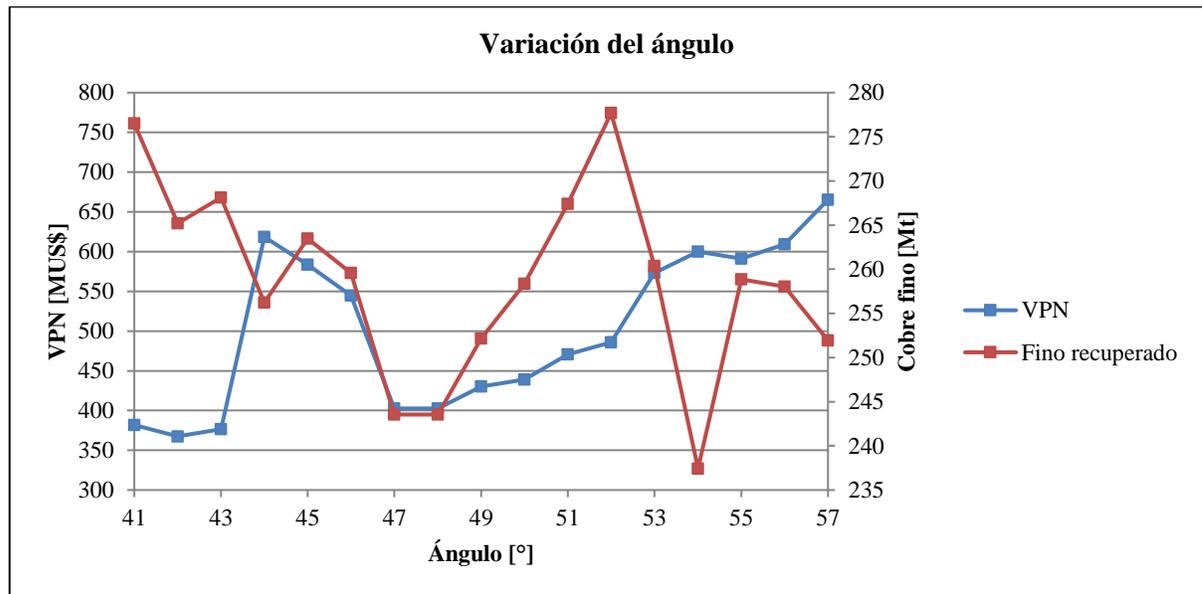


Figura 5-21. Sensibilización del ángulo. Impacto en VPN y cobre fino recuperado

Aplicando sensibilizaciones en los costos de minado y procesamiento, se logra evaluar que recortar ambos conceptos en un 5% genera incrementos de hasta un 30% en el VPN, permitiendo aminorar el *payback* en al menos un año, junto con aumentar en al menos casi dos puntos porcentuales la tasa interna de retorno (Figura 5-22). Es por esto, que distintas políticas de reducción de costos utilizadas en algunas compañías mineras, que, si bien suenan marginales, permiten mejorar los beneficios considerablemente y admiten tener mayor control sobre el margen de la faena, estableciendo con mayor claridad los distintos escenarios a que se ven inmersos.

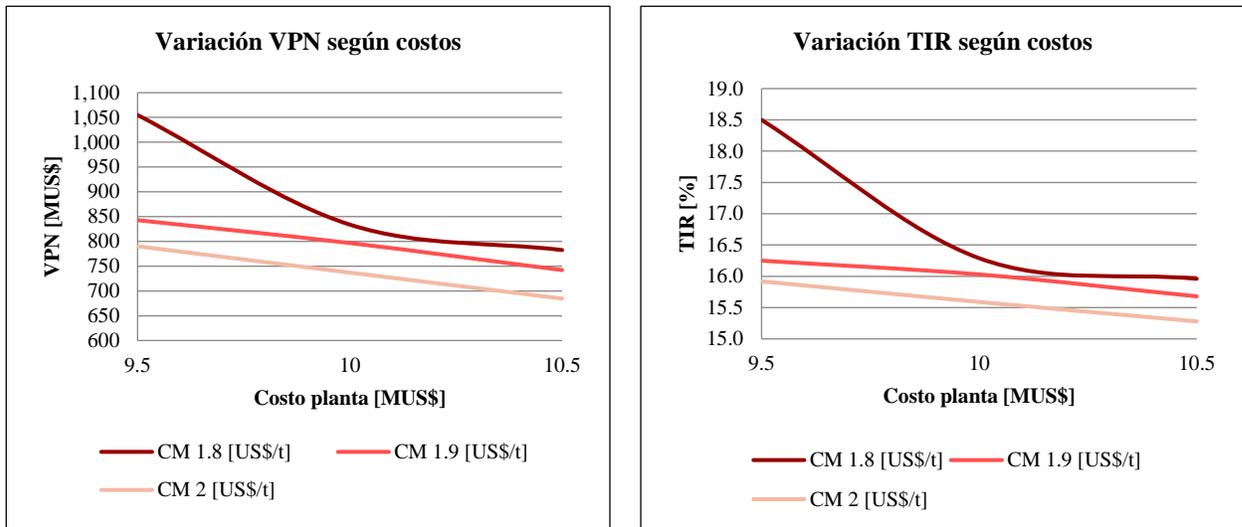


Figura 5-22. Sensibilización en los costos. Izquierda: Impacto en VPN. Derecha: Impacto en TIR

La Figura 5-23 muestra un análisis de sensibilidad del precio del cobre en distintas configuraciones de diseño del yacimiento: tasa de extracción (Mina), procesamiento (Proc) y ley de corte (ley). Es posible observar que una correcta elección de los parámetros de diseño, en términos de escala de producción resiste variaciones del precio, en desmedro de un arreglo que no es óptimo, donde puede disminuir drásticamente su valor al decrecer el precio del metal. En la Figura 5-23 se exhibe que para dichas ordenaciones que no son óptimas, un ascenso porcentual en el precio no advierte mejoras significativas en el VPN del proyecto, tal es el caso de la configuración 2 (66 [Mt] de extracción, 15 [Mt] de procesamiento y ley de corte de 0.45%), donde aumentar el precio de evaluación de 2.58 a 2.72 [US\$/lb] produce un crecimiento marginal del 1% en la valorización del proyecto, esto se debe principalmente a que una mala disposición provoca planes que no son posibles de optimizar. También, para una correcta configuración del tratamiento de mineral, el alza en un 5% en el precio del mineral, incrementa cerca de un 35% la evaluación económica del proyecto.

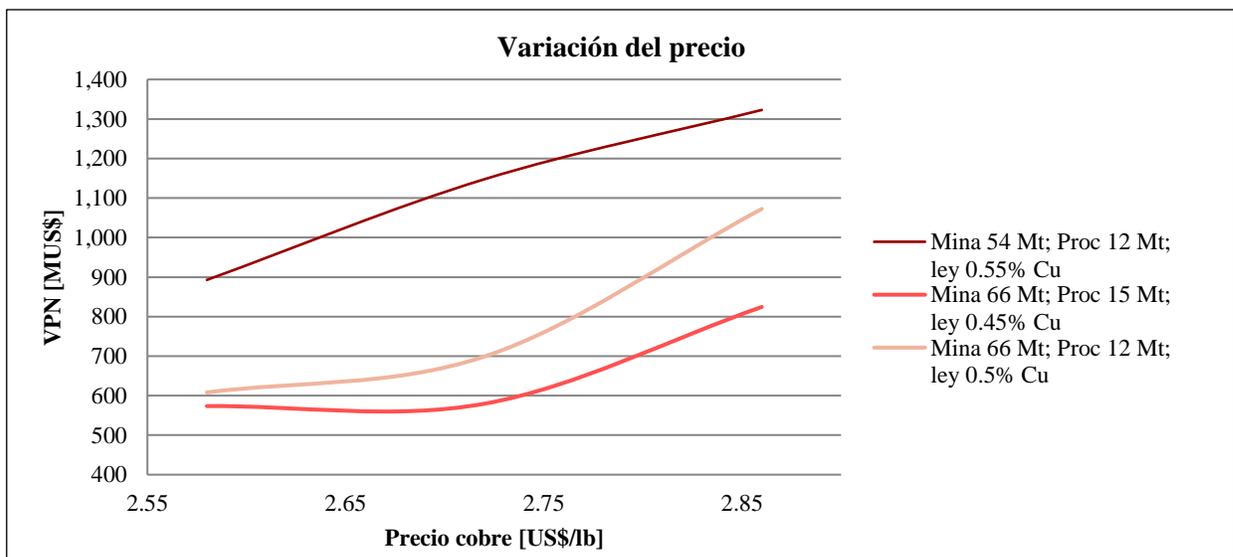


Figura 5-23. Sensibilización precio y escalas de producción. Impacto en VPN

Si estas combinaciones de diseño son evaluadas en un escenario pesimista de costos y precio del metal, se advierte que, para una óptima elección, el VPN no decrece, manteniéndose cercano al estimado en el caso base, mientras que, para el caso de una incorrecta escala de producción, el beneficio económico se reduce hasta los 200 MUS\$.

En concordancia con lo mencionado anteriormente, existen diferencias evidentes entre los planes creados a distintas escalas de producción, específicamente se acentúan a escala local, donde los tamaños de las fases difieren en tonelaje, lo que se traduce en cambios en el ingreso económico de los escenarios. Si se observa el diseño 3 de la Tabla 5-5, posee razones estéril-mineral bastante diversas entre sus cinco fases, por lo que provoca una irregularidad del plan, generando un menor VPN que el resto de los diseños evaluados en la tabla, además, la configuración entregada causa gran cantidad de estéril, en comparación con los planes que poseen mejor VPN. Junto con esto, los escenarios 3 y 4 (que otorgan bajo beneficio económico), poseen otros indicadores que los hacen no ser una opción viable, ya que ostentan una TIR baja, ambos tienen un *payback* de un año más que el escenario mejor evaluado, incluyendo también que la vida útil de la faena decae en dos periodos con respecto al mismo escenario anterior.

**Tabla 5-5. Comparación de escalas de producción**

<b>Diseño</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Capacidad mina [Mt/año]</b>	60	54	66	66
<b>Capacidad Planta [Mt/año]</b>	13.5	12	15	12
<b>Ley de corte</b>	0.50%	0.55%	0.45%	0.50%
<b>Fino Recuperado [Mt]</b>	261.5	244.0	269.4	219.0
<b>Estéril Total [Mt]</b>	1185.2	1012.1	1247.9	1257.8
<b>SR</b>	<b>2.7</b>	<b>2.5</b>	<b>2.7</b>	<b>3.4</b>
<b>Estéril Fase 1 [Mt]</b>	186.9	71.1	165.6	188.2
<b>Mineral Fase 1 [Mt]</b>	67.3	14.1	73.0	62.7
<b>SR Fase 1</b>	<b>2.8</b>	<b>5.0</b>	<b>2.3</b>	<b>3.0</b>
<b>Estéril Fase 2 [Mt]</b>	126.2	98.0	103.6	122.5
<b>Mineral Fase 2 [Mt]</b>	51.9	47.6	63.1	53.2
<b>SR Fase 2</b>	<b>2.4</b>	<b>2.1</b>	<b>1.6</b>	<b>2.3</b>
<b>Estéril Fase 3 [Mt]</b>	207.9	249.3	215.1	232.9
<b>Mineral Fase 3 [Mt]</b>	85.0	54.2	71.3	60.1
<b>SR Fase 3</b>	<b>2.4</b>	<b>4.6</b>	<b>3.0</b>	<b>3.9</b>
<b>Estéril Fase 4 [Mt]</b>	379.4	331.5	350.1	427.6
<b>Mineral Fase 4 [Mt]</b>	98.0	74.1	89.2	57.2
<b>SR Fase 4</b>	<b>3.9</b>	<b>4.5</b>	<b>3.9</b>	<b>7.5</b>
<b>Estéril Fase 5 [Mt]</b>	284.8	262.2	413.6	286.7
<b>Mineral Fase 5 [Mt]</b>	38.9	53.3	75.0	37.0
<b>SR Fase 5</b>	<b>7.3</b>	<b>4.9</b>	<b>5.5</b>	<b>7.7</b>
<b>LOM [años]</b>	<b>36.5</b>	<b>36.4</b>	<b>34.7</b>	<b>34.5</b>
<b>Payback [años]</b>	<b>5.4</b>	<b>4.4</b>	<b>5.8</b>	<b>5.7</b>
<b>TIR [%]</b>	<b>16.0</b>	<b>21.2</b>	<b>13.9</b>	<b>15.4</b>
<b>IVAN</b>	<b>0.6</b>	<b>1.0</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>
<b>VPN [MUS\$]</b>	<b>796.6</b>	<b>1111.2</b>	<b>579.5</b>	<b>608.1</b>

Si se comparan los diseños 1 y 2, se aprecia que en el primer caso se recupera más fino (20 [Mt] más), pero genera más de 100 millones de toneladas de estéril, por lo que evidentemente recuperar mayor cantidad de mineral no asegura un mejor beneficio económico, sumado a esto, al poseer una ley de corte mayor para el segundo caso, este fino recuperado es de mejor calidad por lo que causa mayor ingreso finalmente, lo que se observa en los mejores indicadores económicos que ostenta.

Como es recalcado en el caso de estudio anterior, la inversión depende netamente de la capacidad planta y mina, por lo que perturbaciones en estos factores inciden directamente en la generación de valor, para sustentar los resultados, se estudia el IVAN de los distintos diseños, donde efectivamente, el proyecto con mayor VPN tiene mejor indicador IVAN, pero esto no ocurre siempre; como se observa en la Figura 5-24, los mayores ingresos están demarcados con un círculo rojo y no necesariamente representan la mejor relación VPN/inversión.

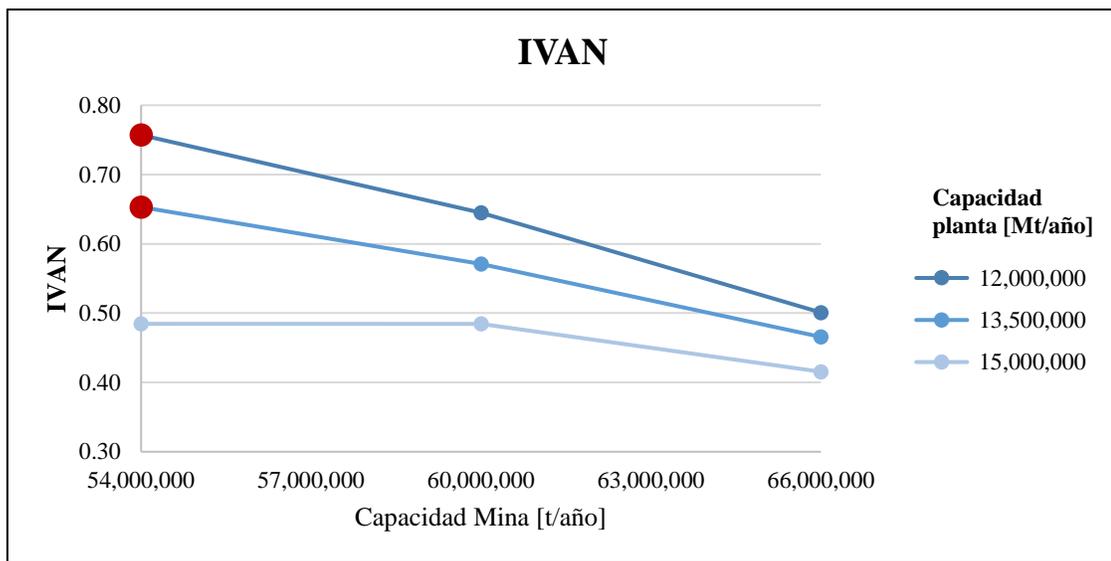


Figura 5-24. IVAN

Es realizado un análisis de las distintas escalas de producción para poder escoger los diseños que serán comparados (incluyendo las variaciones), por lo que existe un gran número de combinaciones de ley de corte y tasas de producción que generan beneficios marginales, llegando a configuraciones que poseen pérdidas económicas para leyes de corte cercanas a 0.3%, es por esto que se debe analizar y escoger correctamente la escala de producción, gráficos que muestran estas configuraciones se encuentran en anexos.

Estudiando la interdependencia entre las variables (Figura 5-25), se obtiene que, con un aumento conjunto entre la ley de corte y el precio del metal, la ganancia económica mejora sobre un 60% y esta valorización crece a un 50% con respecto al caso base, cuando se encuentra en un escenario optimista del precio y mayor ángulo de talud del proyecto. Además, se aprecia que el efecto de la tasa de extracción se vuelve nulo al incrementar la ley de corte, ya que el beneficio se eleva en similar medida, utilizando una ley de corte más alta y diferentes tasas de extracción. Tomando en cuenta una interacción entre la ley de corte y recuperación, un aumento porcentual de ambos conceptos provoca alzas sobre el 40% en la tasación del proyecto. También se puede señalar que un acrecentamiento del 5% de los costos, provoca una disminución del VPN del proyecto en cerca de un 15%.

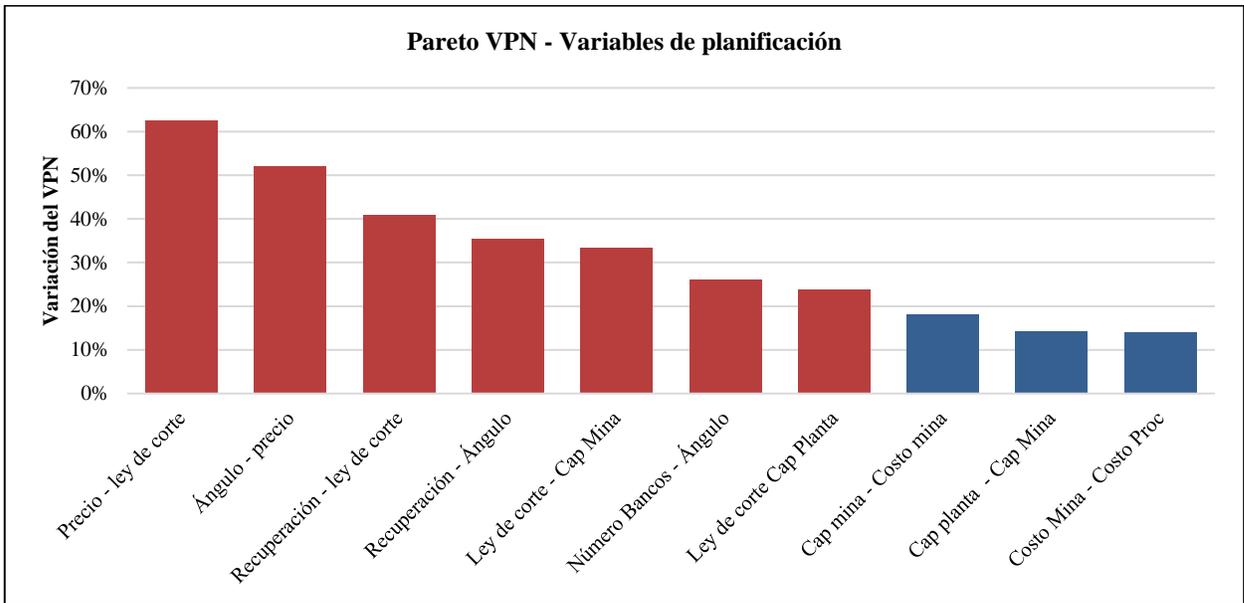


Figura 5-25. Pareto incidencia en VPN de interdependencia de parámetros planificación

Tomando en consideración escenarios pesimistas en los distintos criterios que son utilizados en la evaluación y planificación de la mina, el área que más afecta y reduce el VPN es la incertidumbre de mercado y costos, con un 37%, seguido por el diseño y escala de producción (33%), más atrás se encuentran la metalurgia y estimación de leyes que repercuten con un 15% y 9%, mientras que finalmente se ubica la geomecánica, impactando en un 6%.

### 5.3. Resumen

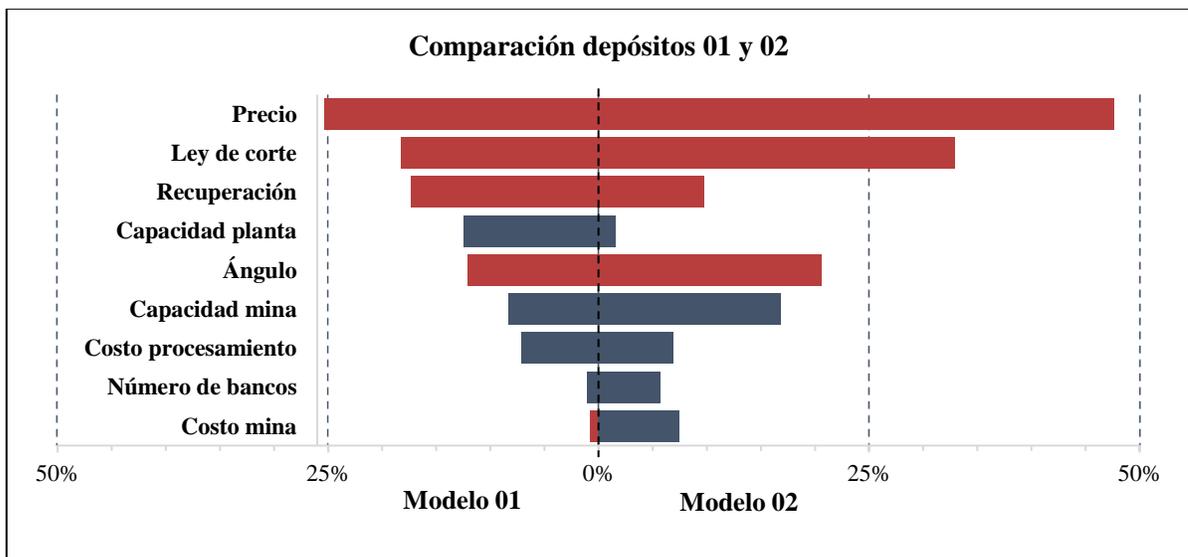


Figura 5-26. Comparación depósitos

Si se comparan las sensibilizaciones realizadas en ambos depósitos, se observa en la Figura 5-26 las diferentes influencias producidas por los parámetros de planificación en el VPN. En color rojo se visualiza un aumento del VPN, mientras que en azul una disminución de este; estas son causadas cuando se genera una sensibilización positiva en dichos parámetros. En ambos casos se produce que la mayor influencia está dada por el precio y la ley de corte, sin embargo, para el segundo

modelo, esta influencia es casi el doble en términos porcentuales. Además, se aprecia que en ambos se genera un mayor VPN (entre un 10% y 20%) cuando aumenta la recuperación y el ángulo global. Cabe mencionar el cambio porcentual entre los depósitos cuando aumenta la tasa de procesamiento y minado, principalmente dado por las diferentes escalas de producción que son utilizadas.

La Tabla 5-6 muestra la comparación entre ambos modelos, considerando todos los parámetros estudiados, estableciendo los rangos positivos y negativos sensibilizados. En la mayoría de los parámetros, los órdenes de magnitud son similares, exceptuando lo mencionado anteriormente, incluyendo, los parámetros de estimación, donde las influencias del alcance del variograma y el número máximo de muestras del segundo modelo estudiado son superiores al del primer modelo. Otro aspecto que rescatar es la leve baja en el VPN cuando disminuye el ángulo y el precio del metal en el segundo caso, esto debido a la forma que posee este yacimiento, donde al disminuir estos factores, cambia significativamente el tamaño y forma del *pit* final, por lo que encontrarse en escenarios más negativos (de estos parámetros) no refleja considerablemente una baja económica.

**Tabla 5-6. Comparación entre ambos depósitos**

	<b>Variación parámetro</b>	<b>Variación VPN Depósito 01</b>	<b>Variación VPN Depósito 02</b>
<b>Alcance variograma</b>	-20%	7%	17.9%
	20%	5.1%	-4.4%
<b>Efecto pepita</b>	-20%	2.3%	0.3%
	20%	4.4%	0.2%
<b># máximo de muestras</b>	-20%	-2.8%	24.3%
	20%	7.7%	-5.0%
<b>Capacidad planta</b>	-10%	2.3%	-4.0%
	10%	-12.4%	-1.6%
<b>Capacidad mina</b>	-10%	-11.2%	12.1%
	10%	-8.3%	-16.8%
<b>Ley de corte</b>	-10%	-20.1%	-14.6%
	10%	18.2%	32.9%
<b>Costo procesamiento</b>	-5%	7.0%	5.8%
	5%	-7.1%	-6.8%
<b>Costo minado</b>	-5%	6.0%	4.7%
	5%	0.7%	-7.5%
<b>Recuperación</b>	-2.5%	-16.1%	-12.8%
	2.5%	17.3%	9.8%
<b>Precio cobre</b>	-5%	-32.0%	-5.0%
	5%	25.4%	47.7%
<b>Ángulo</b>	-5%	-1.3%	0.2%
	5%	12.1%	20.6%
<b># bancos a considerar</b>	-33%	5.8%	-1.8%
	33%	-1.1%	-5.7%

## 6. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA

La metodología es aplicada en dos casos de estudios distintos, que difieren en tonelaje y forma del depósito, además de variaciones en el tipo de mineral que posee cada uno, esto es realizado para poder llevar a cabo la metodología en situaciones disimiles en entre sí y poder entregar resultados globales acorde a las necesidades requeridas. El estudio es realizado para establecer las distintas incidencias de los parámetros y criterios que definen la evaluación y planificación de una faena a cielo abierto, esto principalmente para tener un mayor campo visual a lo que se enfrentará el ingeniero planificador si el escenario en el que se encuentra inmerso varía en cualquier dimensión técnica.

El “DEPÓSITO 01” (minerales de cobre y plata), posee una distribución más homogénea de leyes de cobre, con un mayor tonelaje en comparación con el segundo depósito. Esto genera que los variogramas sean diferentes entre sí, permitiendo establecer incidencias claras de los parámetros de estimación. Al poseer un gran alcance de este, las sensibilizaciones en este factor provocan cambios poco visibles en la valorización económica del depósito, además, al poseer una distribución de leyes más homogénea, la influencia de la baja/alta información de muestras a utilizar tampoco es un factor que repercuta de manera notable en el VPN. Lo mismo es posible observar en el resto de los indicadores técnicos y económicos, donde la variación que puede acentuarse un poco más es que el alza en el efecto pepa provoca mayor recuperación de cobre fino, aunque solo sea un 3% más de lo establecido en el caso base.

Los cambios apreciables son percibidos a escala local, donde al analizar los planes de producción de distintas sensibilizaciones se advierten perturbaciones en la ley media que entra a proceso y principalmente en el uso de las pilas de *stock*, donde el modelo generado con alteraciones negativas en la estimación produce un plan que ocupa gran cantidad de mineral procedente del *stock* durante los primeros años, donde en la mayoría de estos, el mineral proveniente del acopio representa de un 10% a 30% del material que entra a proceso. En cambio, el modelo generado por sensibilizaciones positivas de este criterio usa el acopio solo en cinco periodos y el resto es utilizado cuando ya no queda mineral en la operación, estas modificaciones se deben principalmente a que las leyes que se encuentran más cercanas a superficie, por ende, extraídas en los primeros años, son las que sufren mayores alteraciones con las sensibilizaciones en la estimación de los recursos.

Con respecto a los criterios empleados en la planificación, es posible observar que existe un importante porcentaje de los escenarios que sobre estima o aumenta el beneficio económico por sobre los 400 MUS\$ con respecto al caso base, pero existe menor número de casos que disminuye en gran medida el VPN del proyecto, otro punto rescatable es la variabilidad de vida útil que existe en los escenarios posibles de planificación. Notando las sensibilizaciones realizadas de forma independiente en cada parámetro de planificación, destaca claramente la influencia del precio del metal, pero además, existe gran influencia dada por cambios en la ley mínima de entrada a proceso, lo que conlleva a una evaluación más profunda, ya que tradicionalmente es utilizada la ley de corte marginal la que define los límites del *pit* final y es esta misma la ley mínima que entra a proceso, pero en el caso de estudio, la ley de corte marginal bordea los 0.25%, pero evaluando el escenario base con hasta 0.4% de ley mínima, permite un VPN inferior a los 400 MUS\$.

La recuperación del mineral también es un factor que impacta mayormente la valorización, la cual es considerada constante a través de toda la evaluación y planificación estratégica, por lo que es útil comprender la influencia de variar este parámetro, tomando en cuenta que dentro de la vida de la mina pueden existir cambios en la recuperación que se de en la planta de procesamiento. A su

vez, una disminución del 5% en los costos de minado y procesamiento aumentan el VPN en un 9%, esto es sumamente importante, ya que las políticas de reducción de costos en diversas empresas son determinadas como marginales, pero pueden generar cambios significativos dentro de la valorización. Es más, esta rebaja en los costos provoca mayores ingresos e incrementa en al menos dos años la vida útil de la faena.

Comúnmente, existe la noción de que elevar el ángulo del *pit*, admite un mayor beneficio económico, ya que se baja la razón estéril mineral, se recupera más cobre, etc.; pero esto no siempre es una consecuencia de erguir más el ángulo. Para este caso de estudio, el VPN va mejorando hasta la evaluación en 49°, de ahí en adelante la ganancia es aminorado marginalmente, esto se debe principalmente a que existe menor cantidad de cobre recuperado, en comparación con el estéril que está dentro de la envolvente económica. Además, cambiar el ángulo genera modificaciones en la forma del *pit* final y no necesariamente corresponde a disminuir el tamaño; como se ve en el estudio de nivel de coincidencia de los *pits*, se observa una notoria diferencia de material que entra en la envolvente económica de un escenario y no está en otro y viceversa. Esto permite apoyar a los estudios entregados por la geomecánica, que otorgan valores límites geométricos del yacimiento, basado en factores de seguridad. Con esto es posible establecer si este límite entrega los mejores resultados económicos; o si el atenuar este ángulo permite incrementar estos efectos económicos y operativos. Otro punto que tomar en consideración es si este factor de seguridad está determinado por condiciones conservadoras, lo que permite comprender si aumentar la inclinación provocará algún beneficio notorio en el plan de producción sin comprometer la estabilidad y seguridad de la faena.

El estudio de las escalas de producción refuerza lo establecido de que estas variables deben ser escogidas cuidadosamente para llegar a un óptimo, ya que el VPN es más sensible a perturbaciones de estos parámetros, donde existen claras diferencias en los resultados para los distintos diseños de producción. Específicamente, una correcta elección de estos eleva un 25% el VPN, mientras que una errónea elección reduce este ítem en un 35%, esto se debe sumar a la incertidumbre de mercado, ya que, al considerar variaciones pesimistas de precio, en un diseño óptimo no se producen grandes descensos del valor económico, mientras que una mala elección de escala de producción llega a producir pérdidas insostenibles en épocas de importantes bajas del precio del metal. Estos cambios observados en escala global también pueden ser percibidos a nivel local, ya que la selección de fases no establece planes que sean correctamente operativos, esto se da principalmente por la cantidad de estéril producido en cada fase, lo que se nota en la transformación de la razón estéril mineral de estas.

Sumado a lo anterior, se debe tomar en cuenta que el efecto de la alteración en las tasas de minado y procesamiento poseen una doble consecuencia en la valorización del proyecto, ya que alteran la inversión requerida, es por esto que existe la posibilidad que aumentar la capacidad de procesamiento genere un mayor beneficio, pero es opacado o sostenido por el alza en el CAPEX, lo que rebaja el impacto positivo, además el análisis del indicador IVAN ayuda a interiorizarse con lo que ocurre realmente con la valorización del proyecto, ya que con esto es posible estudiar, de cierta manera, el impacto que genera que la inversión sea considerada una variable dependiente de la tasa de procesamiento y minado, donde no necesariamente el mejor VPN entregará la mejor relación entre este valor y la inversión requerida en el proyecto, por lo que evaluar desde otra arista exhibe distintos tipos de análisis que pueden requerirse para escoger un plan de producción óptimo.

La interdependencia de los parámetros permite estudiar los distintos escenarios que pueden generarse, donde una alta influencia del precio se ve acrecentada cuando se analizan los impactos

de la recuperación, ley de corte y el ángulo, logrando alzas del beneficio de hasta 45%. Por el contrario, un escenario negativo de costo y tasa de procesamiento reduce cerca de un cuarto del valor del proyecto, mientras que aumentos en el costo y tasa de extracción de mineral provocan disminuciones de un 15%; siendo un impacto que es sumamente importante, ya que estos valores pueden ser tratados dadas las políticas entregadas por la compañía.

El segundo caso de estudio comprende un depósito de cobre y oro, el cual posee una distribución más amplia de leyes, donde existen zonas con alto contenido de mineral, a pesar de que la ley media de cobre es de 0.24%; por lo tanto, las sensibilizaciones en la estimación de los recursos afectan en gran medida a los indicadores técnicos y económicos estudiados. En específico, se advierten cambios en la forma y tamaño del plan de producción, en donde este sufre alteraciones notorias, como en el caso del *pre stripping*, ya que cuando se estudian sensibilizaciones positivas de los parámetros, es necesario contemplar dos años para llegar a extraer mineral, mientras que para la mayoría de los otros casos es necesario solo un año, pero este plan de producción genera leyes anuales más homogéneas con respecto a lo observado en la sensibilización 01 (correspondiente a variaciones de -20% en estimación), otro cambio fundamental es el uso de pilas de *stock*, ya que en el caso base, este es utilizado en al menos cinco periodos antes de que se acabe el mineral de la operación, y solo en un periodo representa cerca de la mitad de mineral que entra a proceso (año 20), en cambio en la sensibilización 01, el empleo de acopio se centra en los primeros años, donde en un periodo es la totalidad del mineral que entra a proceso, en cambio para la sensibilización 27, la alimentación hacia la planta proveniente del acopio es cercana al 5% en la mayoría de los periodos, concentrándose el máximo uso hacia fines de la vida útil. Este cambio provoca que existan diferencias de hasta dos años de LOM entre sensibilizaciones. La variación en los planes de producción afecta la alimentación de la planta durante toda la vida útil de la faena y esta variabilidad cambia la optimización del uso de *stockpiles*, ya que en ciertas configuraciones la utilización del acopio se centra en ciertos periodos de tiempo, mientras que en otras se privilegia el uso constante de esta herramienta en diversos periodos de tiempo.

Estudiando las incidencias a nivel macro, se desprende que la falta de información (menor número máximo de muestras) sobre estima el VPN cerca de un 25%, lo que se debe a que al considerar menor cantidad de estas en la interpolación de un bloque dentro de un depósito más heterogéneo, la distribución de las leyes se ve alterada, generando sobre estimación de estas; sumado a aquello, la clasificación de los recursos ocupa un número mínimo de muestras y no estudia la relación directa de la cantidad máxima de estas, por lo que este parámetro afecta dicha clasificación, en específico, al tomar en cuenta un menor número, la cantidad de mineral definido como inferido debiese aumentar y no ser utilizado en el plan de producción. Por lo tanto, esta alza en el VPN es contemplado como una sobre estimación que no necesariamente representa la realidad del depósito. A su vez, dada la forma del depósito, reducir el alcance del variograma también provoca una mayor valorización, de hasta un 15%, lo que representa un importante cambio, reparando en que es la variación de un solo factor dentro de la estimación. Si, además, se aminora el alcance y el efecto pepita, el VPN se acrecienta hasta en un 18%. La explicación del crecimiento del beneficio obtenido a partir de menores alcances del variograma, puede deberse a que reducir este parámetro, genera una sobre estimación de las leyes, destacando una mejora porcentual de las leyes encontradas en el depósito, lo mismo ocurre al disminuir el efecto pepita, existiendo menor sobre estimación de estas leyes en un depósito que no es completamente homogéneo, por lo que se tiende a crear esta situación.

Con respecto al tamaño del *pit* final, el alcance del variograma es el único que produce permutaciones significativas (-5%) en el tonelaje de la envolvente económica, pero analizando el

nivel de coincidencia de los *pits*, se distinguen vicisitudes notorias en la cantidad de bloques que está presente en un *pit* y en el otro no, y viceversa. Donde considerar sensibilizaciones positivas y negativas en todos los parámetros de estimación, provocan que existan cerca de 90 millones de toneladas que están en el mencionado al principio y no en el segundo; y más de 15 millones de toneladas que se encuentren en la situación contraria, por lo que cambios en el tonelaje del *pit* final no entregan un resultado óptimo, sino que también se debe tomar en cuenta la forma que posean estas envolventes.

Los parámetros de planificación provocan cambios sustanciales en la valorización del proyecto, donde existen escenarios que pueden incrementar casi el doble este monto, mientras que otros reducen hasta menos de 400 MUS\$ el VPN, pero la mayoría de los escenarios producen alteraciones de hasta un  $\pm 20\%$ . Al establecer sensibilizaciones de forma independiente, nuevamente el precio y la ley de corte son las variables que inducen perturbaciones significativas en la valoración, seguido del aumento en el ángulo de talud y en la recuperación; también, para el diseño escogido, ascensos en la tasa de extracción impulsan alteraciones del orden del 17% en la tasación, esta misma alza de la capacidad de mina provoca una disminución de la vida de la mina en al menos 10% y una razón estéril mineral mayor (en similar cantidad porcentual). Es necesario analizar que un crecimiento en la tasa de procesamiento no produce cambios significativos en el VPN, pero decae cuantiosamente el SR (-10%), lo que eventualmente puede ser considerado como una mejora dentro del plan de producción, recalcando además que la tasa de procesamiento posee un doble efecto, ya que, al cambiar este valor, se altera la inversión.

Mayores leyes de corte y ángulos generan una enorme reducción del *pit* final, representando decaimientos de al menos 250 millones de toneladas, pero la mayoría de esta caída viene dada por material contemplado como estéril, ya que las tasas de cobre recuperado en estos escenarios no declinan drásticamente, por lo tanto, acortar el tamaño y forma del *pit* puede ser una buena opción para incrementar el VPN del proyecto a evaluar.

Con respecto a la geomecánica del depósito, variaciones en el número de bancos utilizados genera leves perturbaciones en la valorización económica, en donde considerar un mayor número de bancos provoca incrementos en el VPN para cierto ángulo y en otros casos el beneficio baja, por lo tanto, el número de bancos depende netamente de la inclinación que se dé al depósito. Cabe mencionar que este número de bancos debe estar sujeto a ciertas limitaciones que vienen dados por la ubicación que tome la rampa, por lo que la arbitrariedad que toma este parámetro queda definida en base a lo estimado por el diseño.

A su vez, al tener un depósito menos homogéneo que el anterior, existen cambios sustanciales en la valorización económica al ir perturbando el ángulo, principalmente se distingue un alto VPN al tener una inclinación de  $44^\circ$ , mientras que para ángulos de  $47^\circ$  este valor se reduce en gran medida. Esto repercute en la forma y tamaño del *pit*, ya que del mismo gráfico es posible desprender que para pequeñas inclinaciones, la recuperación de mineral es más alta, por lo que la mayor cantidad de estéril que debe extraerse no interfiere en la mejora del VPN.

De manera similar al caso de estudio anterior, una rebaja en los costos, de un 5%, ocasiona grandes beneficios económicos, desde extender el VPN en un 30% hasta aminorar el *payback* del proyecto en un año; lo que refuerza que la disminución de costos, aunque sean de forma marginal, pueden crear grandes alteraciones en la valorización del proyecto y provocar transformaciones en las políticas que establezca la compañía mandante, ya que al entregar los distintos escenarios realizados por cambios en los costos de minado y procesamiento, se pueden realizar esfuerzos para abatir efectivamente los costos o enfocar la mirada en otros parámetros.

Estudiando la incidencia de la incertidumbre de mercado y la escala de producción, se perciben resultados concordantes con el caso anterior, ya que para una correcta configuración de ley de corte, tasa de producción y minado, el valor asciende de sobremanera considerando el mismo escenario de mercado y si el precio decae, el monto generado por esta escala de producción no decrece, en desmedro de una distribución de diseño que no es determinada como “óptima”, la que en escenarios de mercado pesimistas, reduce el VPN hasta los 200 MUS\$. A su vez, un contexto optimista del precio del cobre permite incrementar satisfactoriamente el beneficio económico cuando es escogida una buena combinación de las variables de diseño. Estos parámetros son seleccionados arbitrariamente y dependen solo de los criterios de especialistas para establecer la escala de producción óptima, es por esto, que es necesario instaurar claramente todas las posibles combinaciones de factores anexos a estos y como afectan en la valorización del proyecto, así comprender qué escala de producción resiste de mejor manera perturbaciones de parámetros que dependen de criterios de mercado, geotécnicos, metalúrgicos, etc., por lo que la mejor escala de producción de una configuración de valores externos puede no ser la mejor opción para otra disposición del resto de variables que son utilizadas en la planificación, por lo que se debe aplicar técnicas para evaluar la robustez de estos parámetros.

Estas escalas de producción difieren en el plan de producción que llevan a cabo; como se menciona anteriormente, la disminución de VPN viene dada por la distribución de sus fases, donde se observa que la razón estéril mineral de las fases es muy dispar cuando se trata de escalas que provocan bajo beneficio económico, incluso, se advierte que los planes no son completamente equilibrados cuando existen tasas de retorno bajas y el *payback* de estos escenarios es superior a los establecidos inicialmente.

La metodología permite entender la interdependencia de los parámetros que son sensibilizados, donde destacan claramente que un aumento conjunto en el precio del cobre y variables como la ley de corte, recuperación y ángulo, generan ventajas económicas por sobre el 30% del caso base. Además, es posible comprender el efecto que posee una medida sobre otra, por ejemplo, elevar la ley de corte produce un crecimiento del orden del 30% del VPN y el incremento de la tasa de minado (por separado) reduce este valor en un 17% con respecto al caso base, pero al modificar conjuntamente ambos, en un 10%, provoca un beneficio superior a los 30%, por lo tanto, al cambiar la ley de corte, la capacidad de minado tiene efecto marginal con respecto a la primera.

Estudiando ambos casos, es posible establecer que las mayores desviaciones del plan de producción se deben a perturbaciones en el mercado y los costos asociados (repercutiendo en más de un tercio en ambos casos); las escalas de producción son consideradas como el segundo criterio que más incidencia posee, donde en ambos casos ocupa entre un 25% a 35%, seguido por la metalurgia con un 12% a 15%, finalmente se encuentra la estimación y geomecánica. Es importante recalcar que, dependiendo del tipo y forma del depósito, los porcentajes que toma la estimación y la geomecánica varían ampliamente, como se advierte para el segundo caso de estudio, donde la estimación genera importantes modificaciones en la valorización y el plan de producción del proyecto, en desmedro a las alteraciones marginales producidos en el primer caso de estudio. A su vez, en la geomecánica, pequeñas alteraciones en la inclinación del *pit* generan diversos cambios dependiendo del depósito, donde variaciones de un grado permiten aumentar ligera o trascendentalmente el VPN, debido a la cantidad de estéril o mineral que se ingrese al *pit*.

## 7. CONCLUSIONES

Para realizar la evaluación y planificación estratégica de un proyecto minero, se realiza un análisis de sensibilidad donde comúnmente solo es evaluado el efecto que tiene el precio del metal en la valorización económica del proyecto, sin hacer mayor alusión al resto de variables e indicadores que entran en juego en esta etapa. El estudio realizado propone una metodología que pretenda realizar una serie de sensibilizaciones y estudios de los parámetros que pueden ser críticos dentro de las distintas etapas de la evaluación de un proyecto; esto permite cuantificar la incidencia de estos, su interdependencia y cómo influyen en la evaluación técnica y/o económica.

La alteración en el precio del metal provoca grandes desviaciones en el VPN de los proyectos y es el factor más influyente en ambos casos de estudio, al igual que en la mayoría de los depósitos mineros, pero este es un factor externo que está sujeto a la incertidumbre del mercado, por lo tanto, realizar sensibilizaciones permiten comprender que sucederá con el depósito frente a diferentes cambios en el mercado. Pero existen variables que dependen del equipo técnico que diseñe y planifique la operación, por lo tanto, estas pueden y deben ser constantemente evaluadas para maximizar el beneficio del proyecto, tal es el caso de la escala de producción, donde transformaciones en la ley de corte, tasas de minado y procesamiento causan aumentos significativos, tanto en la valorización económica, como en el resto de los indicadores y en algunos casos logran soportar correctamente alteraciones del mercado. La metodología propuesta, procura evaluar los cambios en las tres variables mencionadas, alterando el escenario generado por el resto de los parámetros que pueden ser sensibilizados, tal es el caso de comparar el cambio de ángulo o la recuperación en las distintas escalas de producción y poder escoger la opción que sea más rentable en el paso de los años. Optimizar esta escala de producción logra elevar el VPN por sobre el 35% dependiendo del depósito evaluado.

Tradicionalmente, se entiende que levantar la inclinación del *pit* consigue la obtención de mayores beneficios, pero como se advierte en los casos de estudio, esto no siempre es totalmente correcto, donde para el segundo modelo, aumentar de 49° a 51° sí provoca un crecimiento económico significativo, mientras que para un alza de 47° a 49° la ganancia es marginal, esto se debe principalmente a que en el primer escenario, el incremento permite recuperar mayor cantidad de mineral en comparación al estéril que se debe extraer, en cambio para el segundo, erguir la inclinación impide que se extraiga el mineral que está en los límites del *pit*, es por esto que deben ser evaluadas todas las aristas del plan, para estudiar técnica y económicamente el proyecto y no solo basar los resultados en el VPN generado.

El análisis realizado permite comprender el efecto que se genera cuando existen sobrecostos de minado y/o procesamiento, o, por el contrario, si se desean aplicar políticas que incentiven la reducción de estos costos. Por ejemplo, para el primer modelo de bloques, una baja del 5% en los costos, incrementa el VPN en un 13%, con esto se permite tener un margen económico mayor y más extracción de material, traduciéndose en un incremento de dos años la vida de la mina, lo que puede resultar muy beneficioso para la compañía mandante.

La incertidumbre geológica repercute directamente, ya que la forma y distribución de las leyes en el depósito establece cambios significativos en la estimación y posterior planificación. Esto se observa principalmente en el segundo yacimiento, el cual posee una distribución espacial más heterogénea que el primer caso, por lo que pequeñas variaciones en el variograma repercuten en la planificación. Es más, la influencia de la poca o alta información (dada por la cantidad máxima de muestras a considerar en el *kriging*) es sumamente importante, ya que en este tipo de depósitos la

poca información genera una sobre estimación del VPN del orden del 20%, debiéndose principalmente a que la distribución espacial está instaurada de tal manera que existe una sobre estimación de las leyes. Además, el efecto de estas debería estar ligado a la clasificación de recursos, donde se crea una estrecha relación que tiene la poca información de la cantidad máxima de muestras utilizadas en la sobre estimación del valor del proyecto, con el mineral clasificado como inferido. Es por esto, que la clasificación debe contemplar, en cierta medida, cambios en este parámetro.

Los estudios efectuados comúnmente, permiten realizar comparaciones entre valores de ciertas variables con resultados específicos (preferentemente VPN); con este trabajo es posible realizar una serie de análisis que generen comparaciones en distintas proporciones, tanto a nivel global como local, permitiendo evaluar las incidencias de los parámetros en los diversos aspectos de la planificación. Un ejemplo visto en el trabajo es la evaluación de diferentes escalas de producción, donde es posible vislumbrar perturbaciones a nivel de tonelajes dentro de las fases, permitiendo discernir entre un escenario y otro, sin considerar solamente el beneficio económico determinado por el VPN. Otro aspecto estudiado se centra en el tonelaje del *pit* final, ya que los diversos escenarios causan diferencias en los tonelajes de las envolventes finales, pero estas diferenciaciones no solo se aprecian en el cambio de tonelaje mencionado, sino que también existen diversificaciones en la forma que posee el *pit* entre un plan y otro.

Con todo esto, es posible realizar análisis multidimensionales, abarcando todas las aristas que permitan encontrar el mejor plan de producción o situar todos los posibles escenarios que se pueden localizar al ser sometidos a distintas incertidumbres y modificaciones de parámetros. Como la mayoría de estos son establecidos por simples reglas, información técnica o basado meramente en criterios, es necesario tener la noción de los escenarios viables que se enfrenta el planificador si existen cambios en las variables definidas por un “factor humano” y que no necesariamente representarán la opción correcta, en términos de optimización y realidad del depósito. Específicamente, en los casos estudiados, los criterios que provocan mayor impacto en la planificación es la incertidumbre de mercado y las escalas de producción, seguidos apartadamente por criterios metalúrgicos, geomecánicos y estimación de recursos, donde este último varía en gran medida dependiendo de la distribución de leyes y tamaño del depósito.

La metodología finalmente logra cuantificar las incidencias de los criterios que son utilizados en el proceso de evaluación de un depósito, permitiendo centrar el énfasis en los parámetros que impactan en mayor medida en el proyecto y establecer relaciones entre estos, encontrando la existencia de interdependencia entre los factores. Esto ayuda a vislumbrar previamente los distintos escenarios que pueden ser generados en la etapa de planificación estratégica, con lo que es posible afrontar de buena manera, cambios en las diversas dimensiones técnicas de las evaluaciones de proyectos mineros; observando a la vez, todos los indicadores técnicos y económicos, basándose en el VPN, pero logrando fundamentarse en todas las aristas, a nivel macro y micro, que entregan resultados óptimos.

## 8. RECOMENDACIONES

El estudio realizado genera un nuevo campo para efectuar diversos tipos de análisis multidimensionales posibles, por lo que se recomiendan diversos puntos para poder ser tratados más adelante, dentro de los que destacan:

- Incluir mayor cantidad de parámetros de estimación de recursos. Esto permite encontrar resultados geoestadísticos que puedan ser evaluados dentro de la planificación estratégica en minería a cielo abierto, lo que de cierta manera unifica ambos campos de estudio para lograr resultados más acordes a lo esperado en la planificación. Principalmente, ahondar en la anisotropía que puede existir en los depósitos.
- Establecer una conexión entre la clasificación de los recursos y los resultados existentes al considerar variaciones en la estimación de los recursos. Ya que como se observa en el trabajo, puede existir una sobre estimación de la valorización económica del depósito cuando se toma en cuenta poca información recopilada, además se debe estudiar en mayor profundidad el efecto de disminuir o aumentar el alcance del variograma, permitiendo encontrar diversas relaciones.
- Mayor profundidad en el estudio de planificación. Es posible realizar las sensibilizaciones en los parámetros de planificación, pero estos valores se han contemplado como constantes a través del tiempo, ¿cuál es el efecto de realizar estas sensibilizaciones y que estos valores varíen a través del tiempo? Ejemplos de ir aumentando los costos a través del tiempo, cambiar las escalas de producción, etc.
- Parámetros como funciones. Como se menciona en el punto anterior la mayoría de estos son considerados constantes, ¿qué sucede si son evaluados como funciones, que dependen de otras variables, o de los mismos parámetros sensibilizados, como el caso del CAPEX? Un ejemplo claro es la recuperación, ya que esta puede ser perturbada dependiendo del *work index*, o de otro parámetro que puede ser sensibilizado.
- Realizar optimización. Dentro de los escenarios generados es posible realizar diversos tipos de optimizaciones, ya sea por ley de corte, por *stockpiles* u optimizaciones simultáneas, que permitan evaluar el real impacto en los diversos escenarios establecidos.
- Ampliar el campo de planificación. Es posible llevar a cabo este estudio en distintos horizontes de planificación, así como desarrollarlo para minería subterránea.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel Sabour, S. & Dimitrakopoulos, R. (2011). Incorporating Geological and Market Uncertainties and Operational Flexibility into Open Pit Mine Design. *Journal of Mining Science*, 47(2), 191-201.
- Astudillo Moya, M. (2012). Fundamentos de Economía. UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas: Probooks. México.
- Cáceres, A. (2017). Principios Simulación Geoestadística. Semestre Otoño 2017. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- Carrasco, P, Chiles, J.P & Séguret S.A. (2008). Additivity, metallurgical recovery, and grade. *8<sup>th</sup> international Geostatistics Congress*.
- COCHILCO (2017a). Informe de Tendencias del Mercado del Cobre – Segundo trimestre de 2017.
- COCHILCO (2017b). Informe de Tendencias del Mercado del Cobre – Tercer trimestre de 2017.
- Dimitrakopoulos, R, Farrelly, C. T. y Godoy, M. (2002). Moving forward from traditional optimisation: grade uncertainty and risk effects in open pit design. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, 111, 82-88.
- Erdem, O., Güyagüler, T. & Demirel, N. (2012). Uncertainty assessment for the evaluation of net present value: a mining industry perspective. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, SAIMM, May 2012*, 112, 405-412.
- Gaupp, M. (2008). Methods for Improving the Tractability of the Block Sequencing Problem for an Open Pit Mine, 1-25.
- Goycoolea, M, Espinoza, D, Moreno, E and Rivera, O. (2015). Comparing new and traditional methodologies for production scheduling in open pit mining. *APCOM*, 352-359.
- Gutiérrez, H y De la Vara, S. 2008. Introducción al diseño robusto (Taguchi) (cap.9, pp.294-317) En Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición. México: McGrall-Hill Interamericana.
- Hall, B. E. (2003). How Mining Companies Improve Share Price by Destroying Shareholder Value. En *CIM Mining Conference* (pp. 1–17).
- Hall, G. (2009). The Need for Validation of Optimisation Solutions in Mine Design. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 119-123.
- Kear, R.M. (2006). Strategic and tactical mine planning components. *J. S. Afr, Inst. Min. Metall.* 106, 93-96.
- Lerchs, H., & Grossmann, I. F. (1965). Optimum Design of Open-Pit Mines. *Transactions, Canadian Institute of Mining*, 68(1), 17–24.
- Letelier, I. (2012). *Impacto de la incertidumbre del modelo geológico en un proyecto minero. Memoria de Ingeniería Civil de Minas*, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- McCarthy, P. L. (2003). Managing technical risks for mine feasibility studies. *Proceeding, Mining Risk Management Conference. Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 21 - 27.

- McCarthy, P. L. (2010). Setting Plant Capacity. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 1-6.
- Mohammadi, S; Kakaie, R; Ataei, M; Pourzamani, E. (2016). Determination of the optimum cut-off grades and production scheduling in multi-product open pit mines using imperialist competitive algorithm (ICA). En *Resources Policy* 51, 39-48.
- Morales, N & Rubio, E. (2010). Robust open-pit planning under geological uncertainty. *Proceedings of the 4th International Conference on Mining Innovation, MININ 2010*, 235-244.
- Parra, A. (2015). *Planificación minera a cielo abierto utilizando fundamentos geomecánicos. Tesis Magíster en Minería*, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pizarro, N. (2016). Plan Aumento de Competitividad 2016. [en línea]. Codelco, 2016. Recuperado en: [https://www.codelco.com/codelco-amplia-plan-de-reduccion-de-costos/prontus\\_codelco/2016-01-14/125754.html](https://www.codelco.com/codelco-amplia-plan-de-reduccion-de-costos/prontus_codelco/2016-01-14/125754.html) Consultado el: 18 diciembre de 2017.
- Poblete, C., González, M., Romero, J., Fuentes, D and Abdrashitova, O, (2016a). ‘Use of Robust Design Methodology for Production Scale Definition in Open Pit Mining’. In *Proceedings Ninth AusIMM Open Pit Operators Conference 2016*, pp 284–291 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Poblete, C., González, M., Romero, J., & Fuentes, D. (2016b). ‘Impact of the starting point and of the direction of open pit exploitation on the mining plan’. In *MININ Conference* (Proceedings, Chapter 1).
- Seguel, S. (2017). *Incorporación de atributos geometalúrgicos e incertidumbre geológica en la definición del pit final y la secuencia de extracción de largo plazo. Memoria de Ingeniería Civil de Minas*, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sinclair A.J. & Blackwell G.H. (2002). Applied Mineral Inventory Estimation, *Cambridge University Press, Cambridge*.
- Smith, M. L. (2001). Using Milawa/4X as a Starting Solution for Mixed Integer Programming Optimisation of Large Open Cut Production Schedules. Strategic Mine Planning Conference, 75-82.
- Tapia, M. (2015). *Metodología de control del riesgo en planes de minería a cielo abierto sujetos a incertidumbre. Memoria de Ingeniería Civil de Minas*, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Troncoso, S. (2015). Apuntes Sistemas Mineros. Semestre Primavera 2015. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile.
- Thompson, M. & Barr, D. (2014). Cut-off grade: A real option analysis. En *Resources policy* 42, 83-92.

# 10. ANEXOS

## ANEXO A. Varianza kriging modelo 01

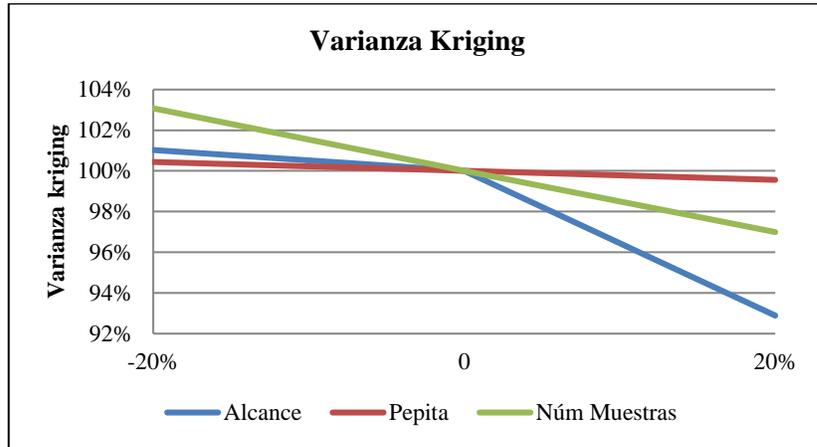


Figura 10-1. Varianza kriging

## ANEXO B. Histogramas modelo 01

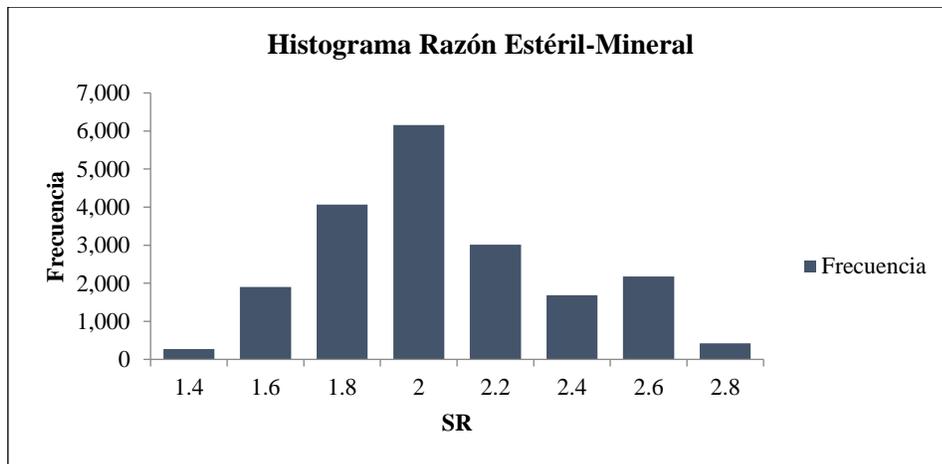


Figura 10-2. Histograma Razón Estéril Mineral - Modelo 01

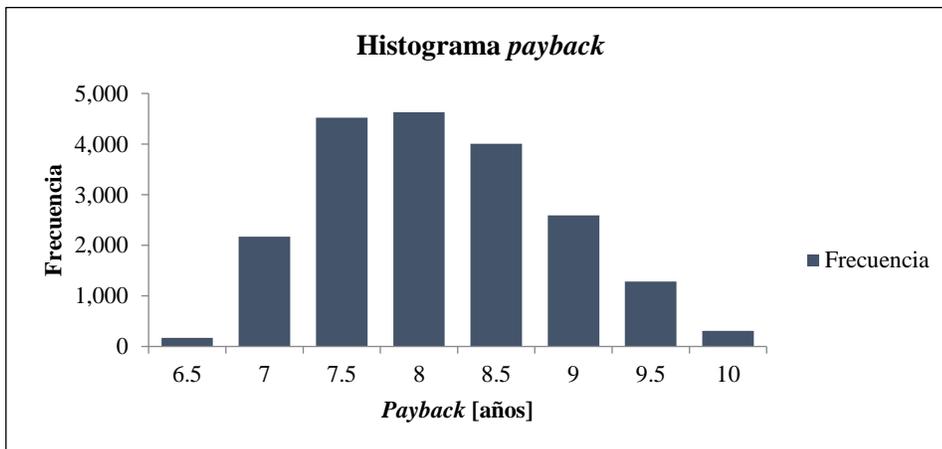


Figura 10-3. Histograma *payback* - Modelo 01

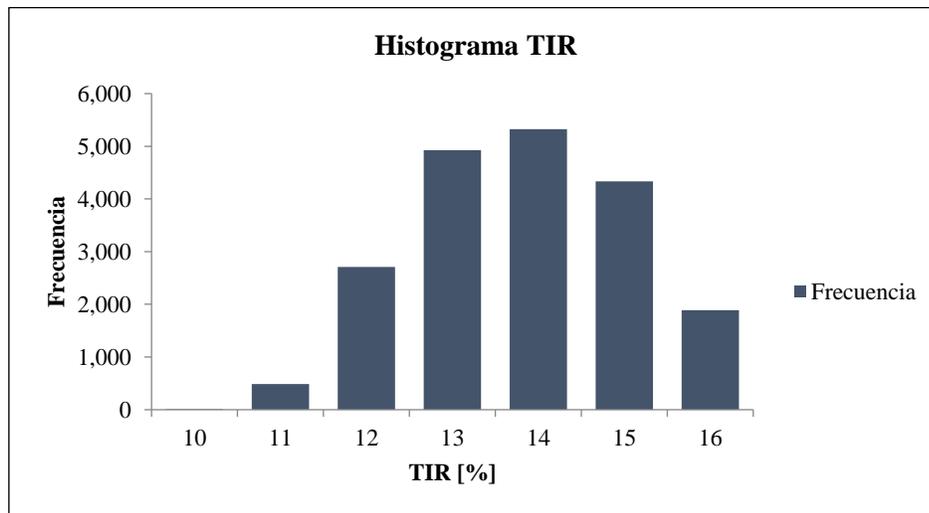


Figura 10-4. Histograma TIR - Modelo 01

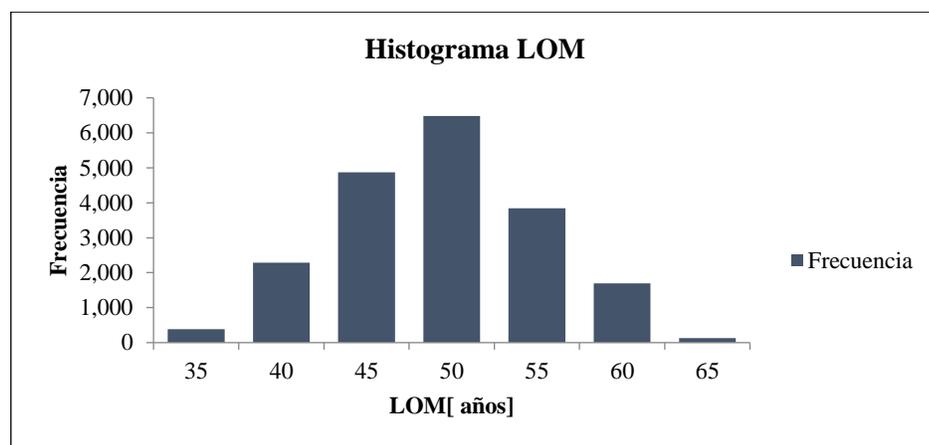


Figura 10-5. Histograma LOM - Modelo 01

### ANEXO C: Escalas de producción Modelo 01

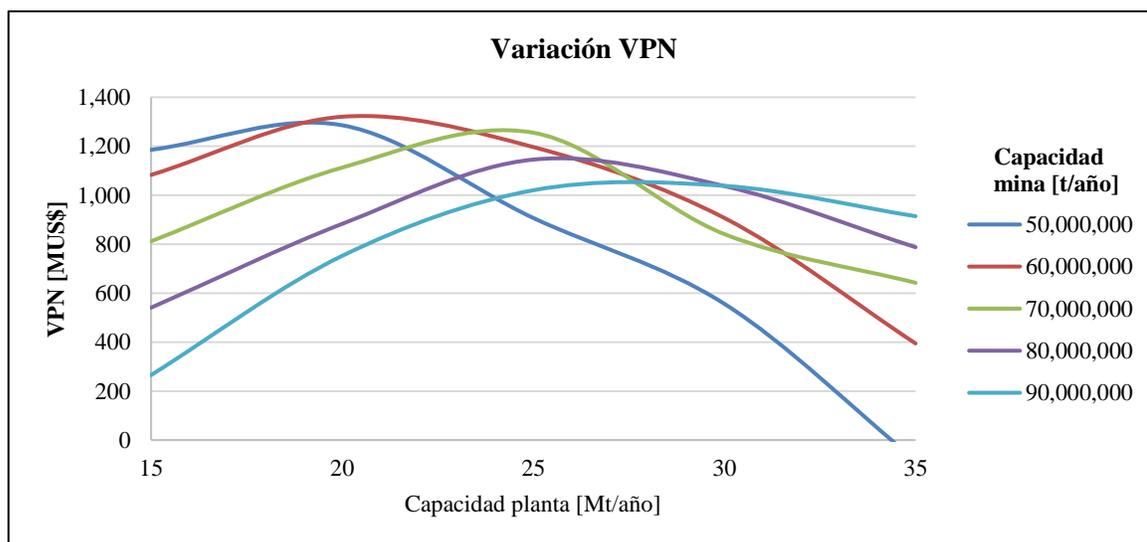


Figura 10-6. Variación VPN-Capacidad mina y capacidad planta

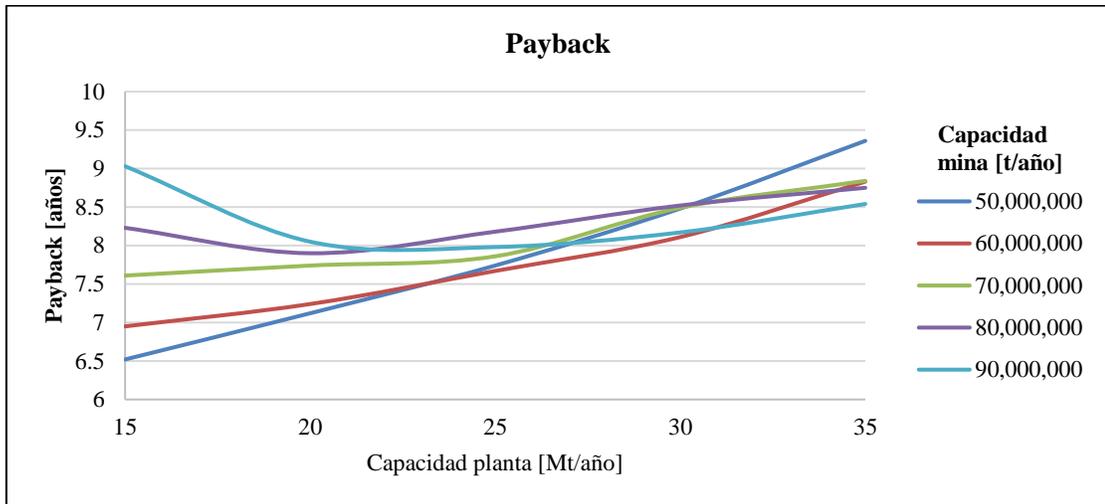


Figura 10-7. Variación *payback*. Capacidad mina y capacidad planta

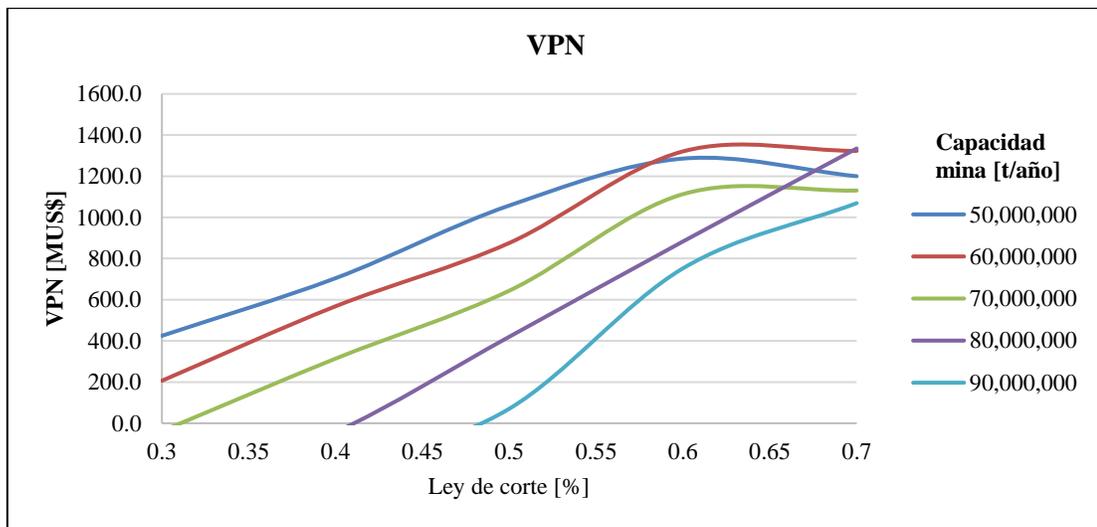


Figura 10-8. Variación VPN. Capacidad mina y ley de corte

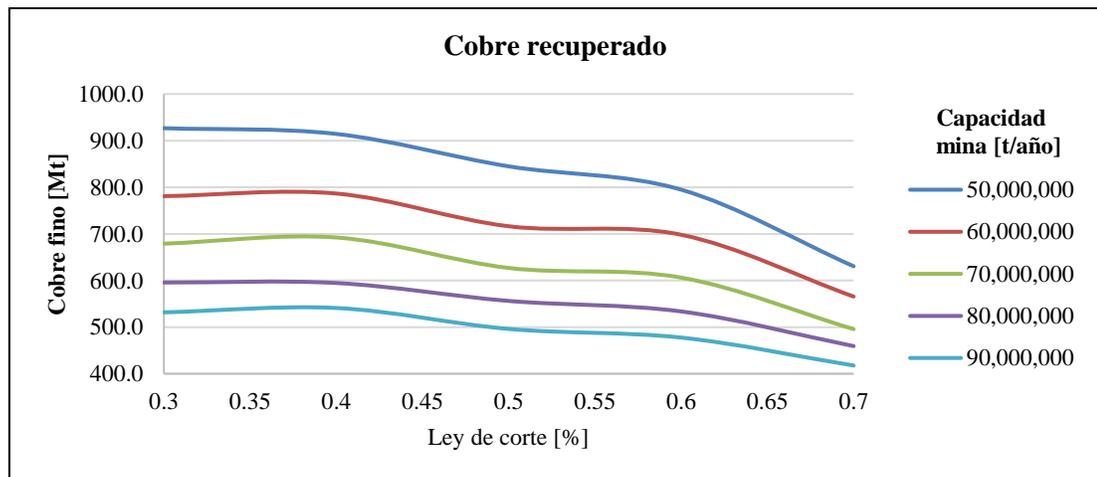


Figura 10-9. Cantidad de cobre recuperado. Capacidad mina y ley de corte

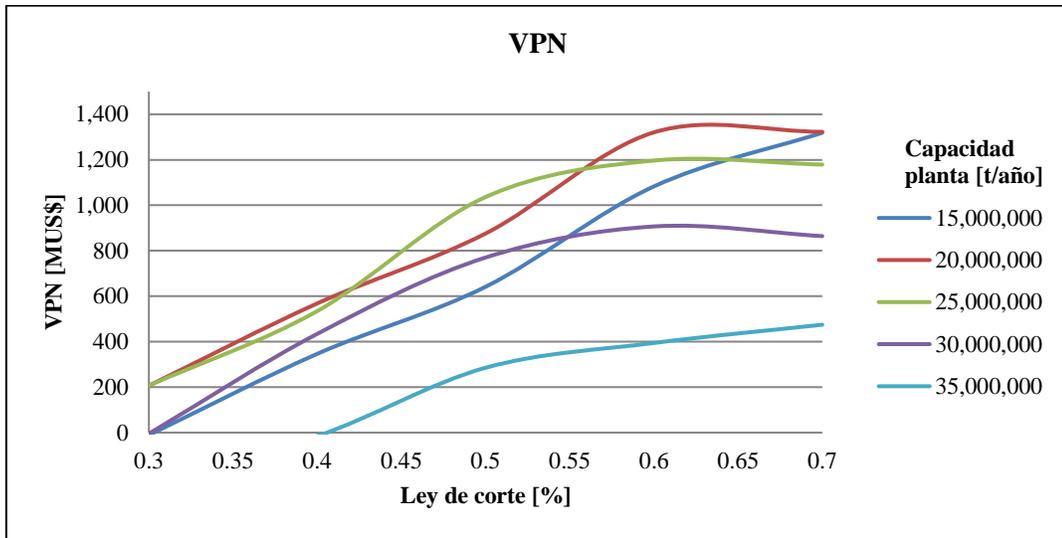


Figura 10-10. Variación VPN. Capacidad planta y ley de corte

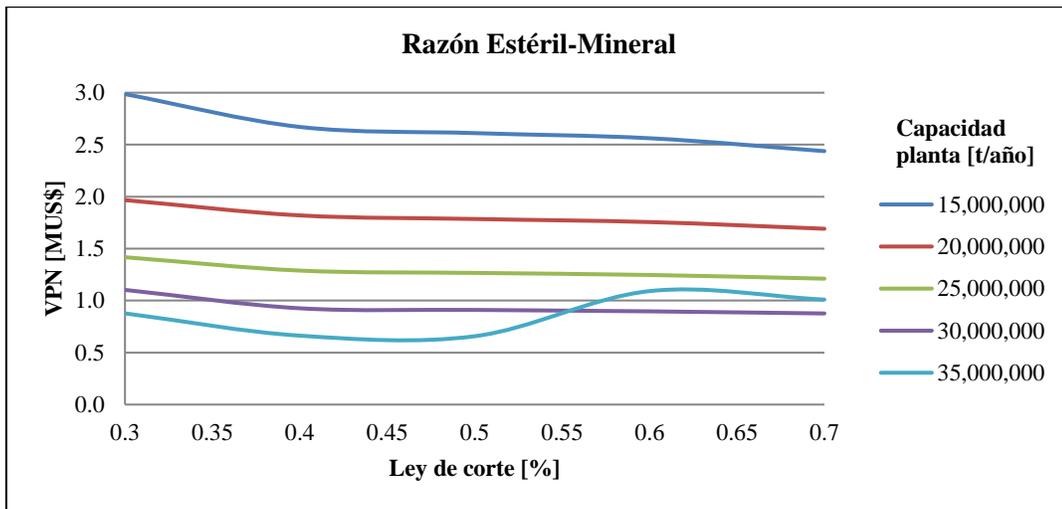


Figura 10-11. Variación razón Estéril-mineral. Capacidad planta y ley de corte

**ANEXO D: Varianza kriging modelo 02**

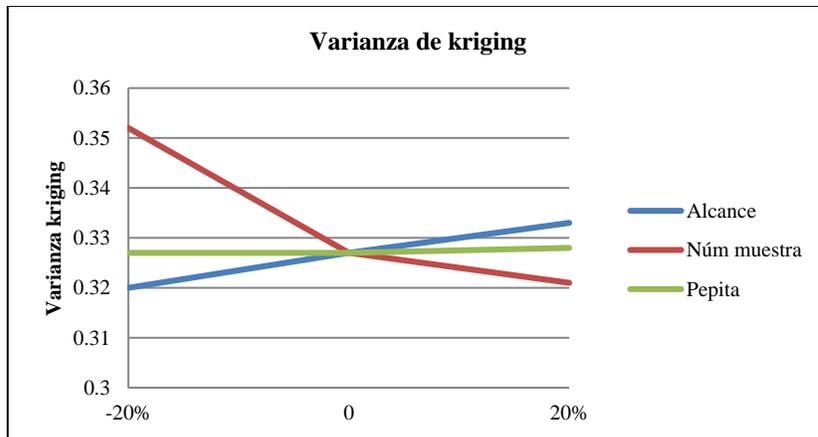
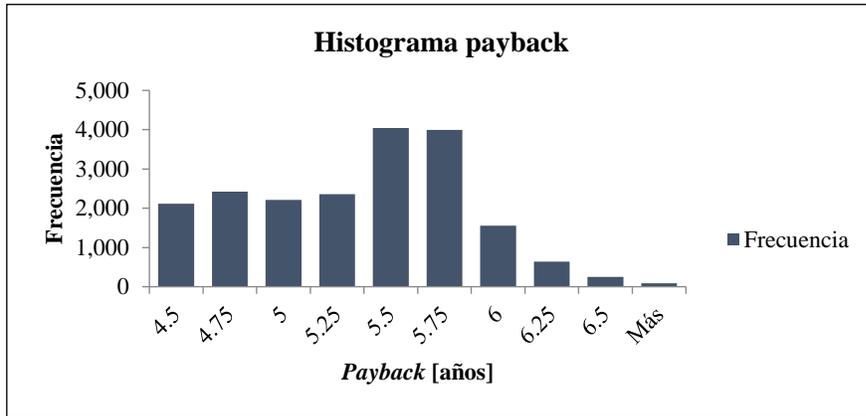
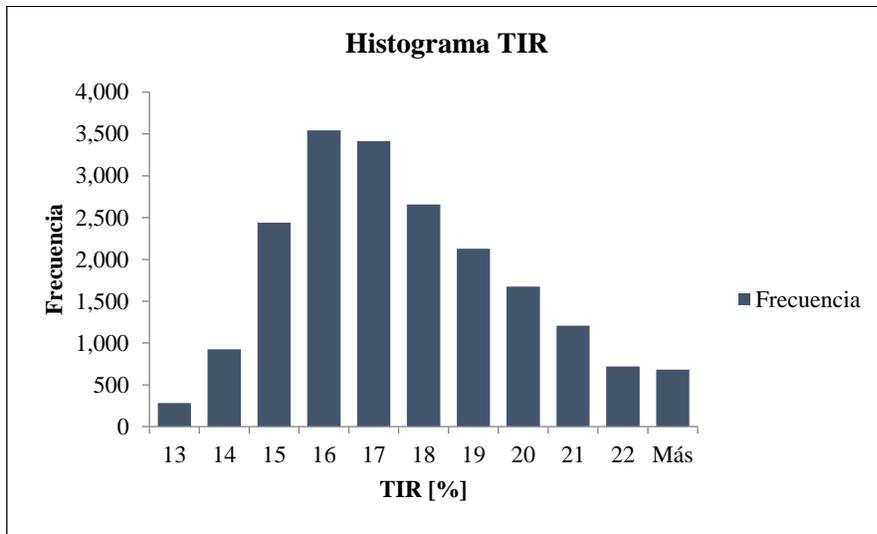


Figura 10-12. Varianza kriging

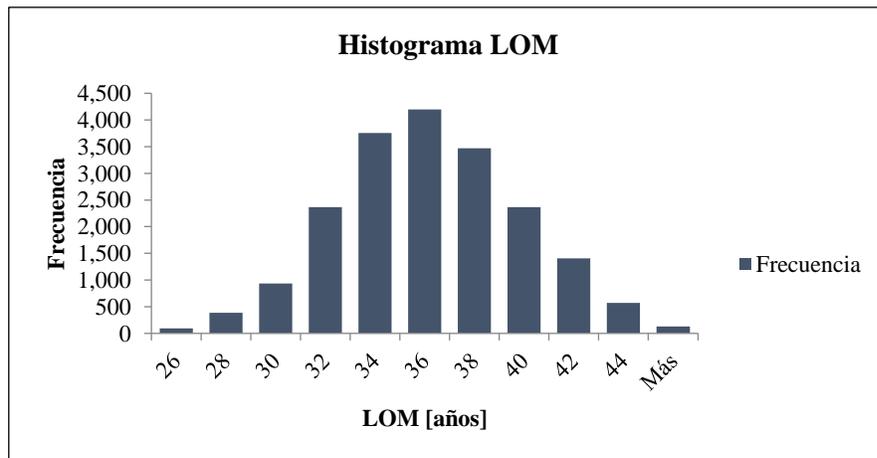
**ANEXO E: Histogramas modelo 02**



**Figura 10-13. Histograma payback**



**Figura 10-14. Histograma TIR**



**Figura 10-15. Histograma LOM**

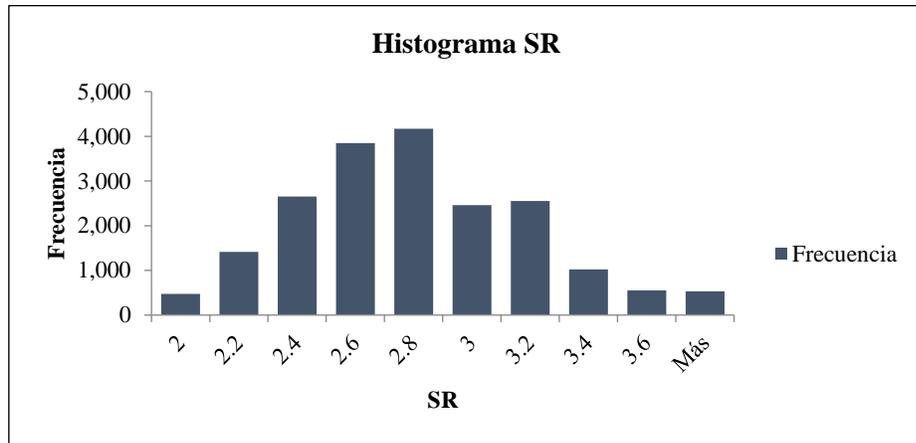


Figura 10-16. Histograma SR

### ANEXO F. Escalas de producción modelo 02

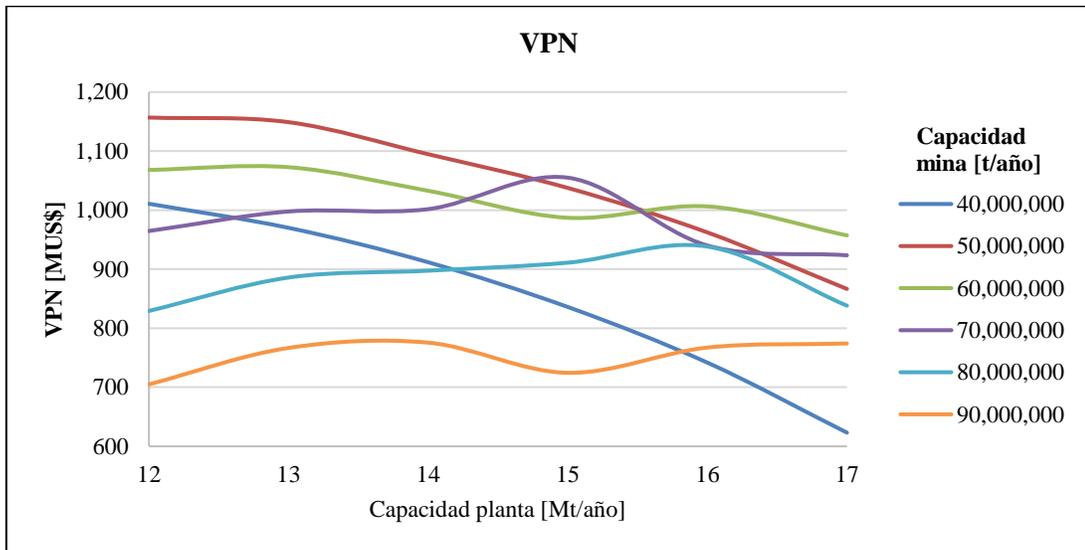


Figura 10-17. Variación VPN. Capacidad planta y capacidad mina

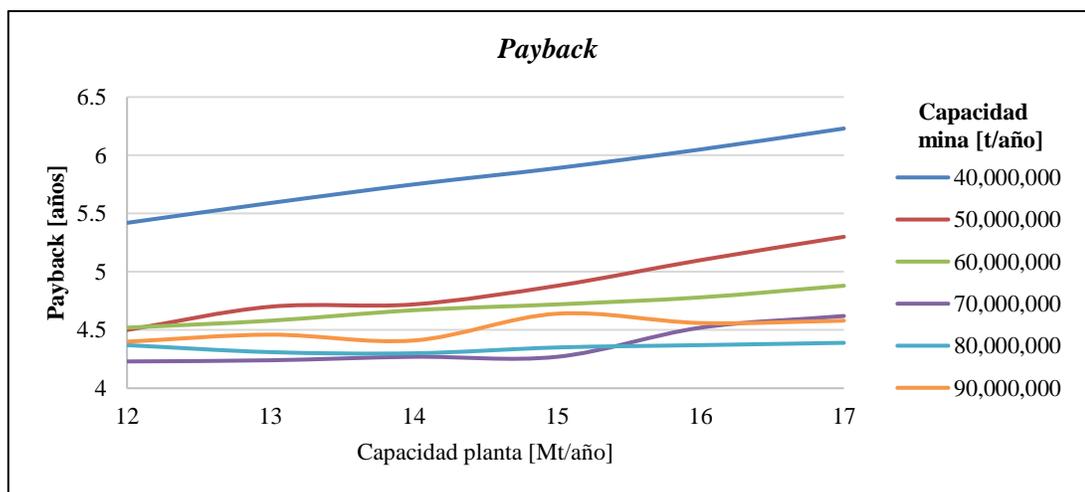


Figura 10-18. Variación payback. Capacidad planta y capacidad mina

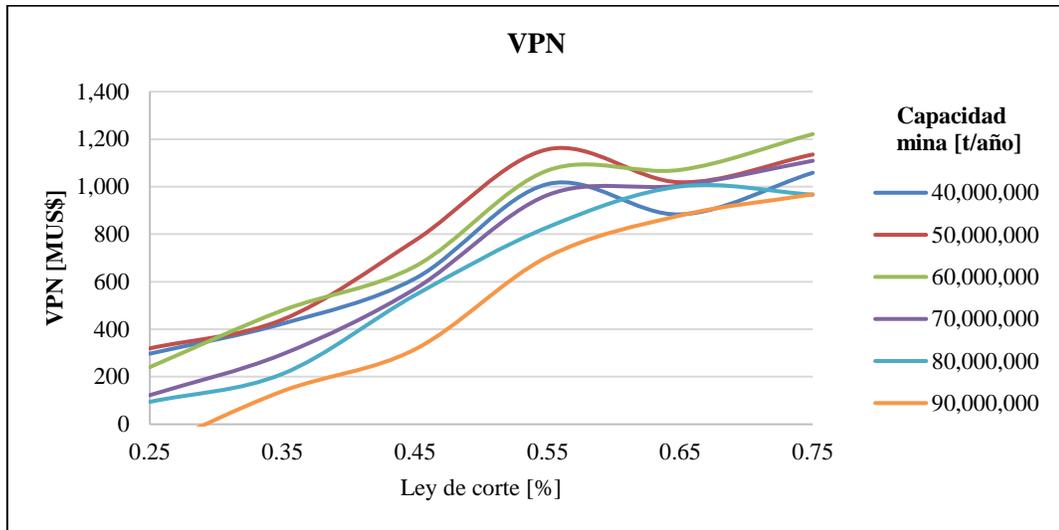


Figura 10-19. Variación VPN. Capacidad mina y ley de corte

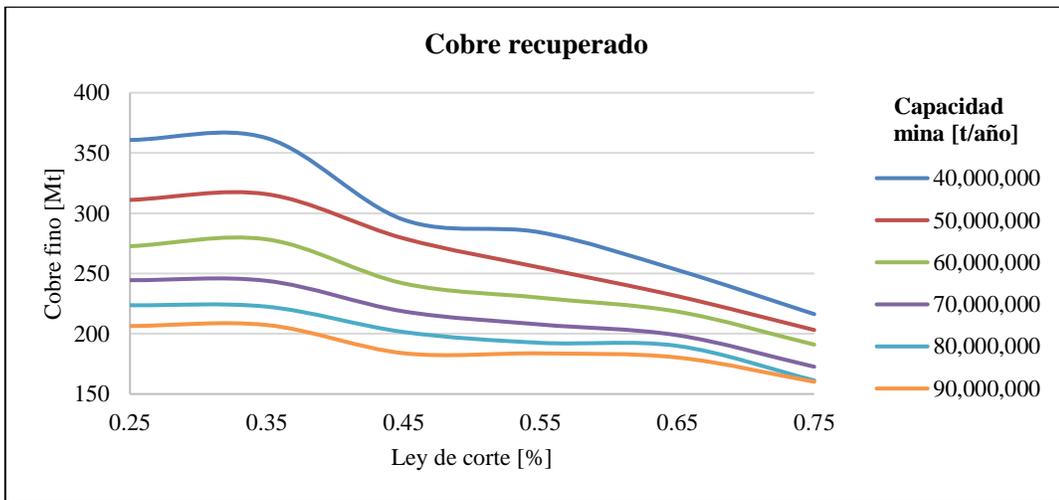


Figura 10-20. Variación cobre recuperado. Capacidad mina y ley de corte

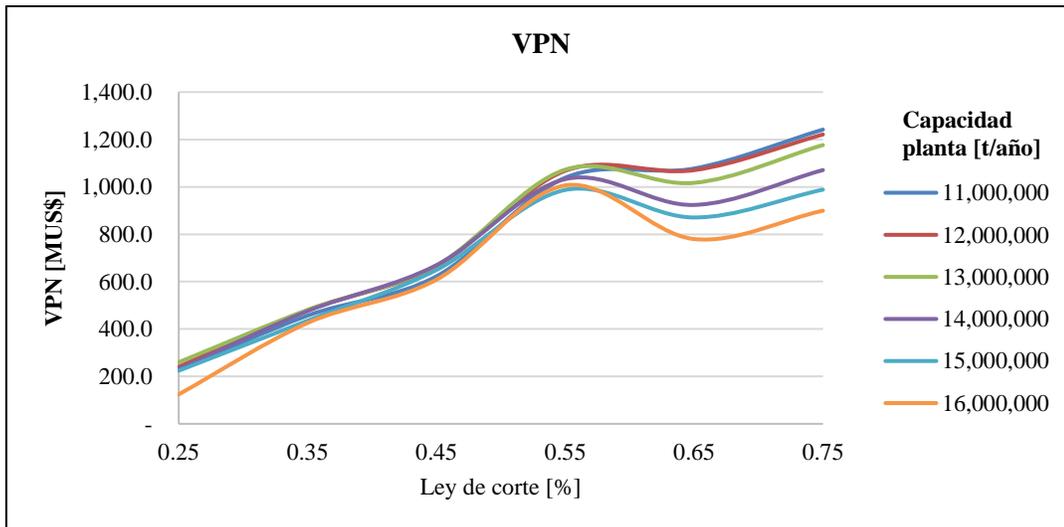
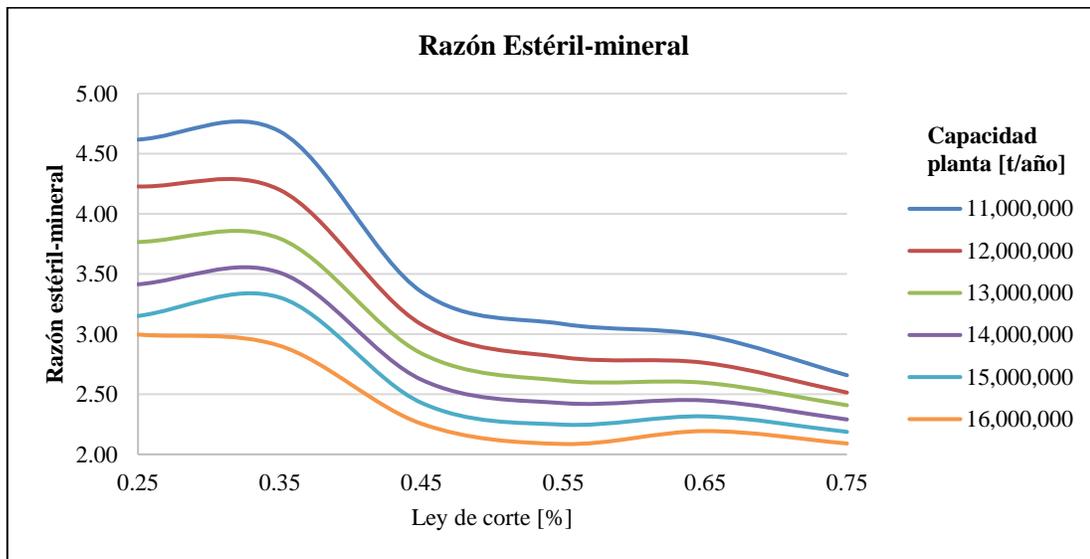


Figura 10-21. Variación VPN. Capacidad planta y ley de corte



**Figura 10-22. Variación Razón Estéril-Mineral. Capacidad planta y ley de corte**