

Metodología de planificación minera a cielo abierto considerando planes alternativos

D. Meneses, AMTC, Universidad de Chile, Chile

N. Morales, AMTC, Universidad de Chile, Chile

E. Jélvez, AMTC, Universidad de Chile, Chile

Resumen

La minería a cielo abierto se caracteriza por ser operacionalmente flexible si se compara con la minería subterránea y, en general, logra ser altamente productiva. En este contexto, la planificación minera toma un rol preponderante en llevar este tipo de operaciones a las más altas rentabilidades en un entorno de riesgo controlado. A nivel estratégico, las decisiones deben estar orientadas a identificar cualquier evento que podría afectar el futuro de una operación minera a cielo abierto, por lo que uno de los factores que más atención recibe, es el precio de venta del commodity. El problema es que el comportamiento de esta variable exógena es muy difícil de predecir en el mediano y largo plazo, por lo que han surgido innumerables intentos, tanto por predecir su valor esperado, como por manejar su variabilidad. Bajo este enfoque, entendemos la flexibilidad como la mejor forma que tiene el plan de producción de adaptarse a los cambios en el precio. Una forma de incorporar flexibilidad es por medio de cambios en las capacidades mina y planta, haciendo la operación más pequeña en precios bajos y expandir la operación en precios altos, para aprovechar las condiciones económicas. En este trabajo se modela el precio del commodity utilizando un enfoque de simulación, flexibilizando la capacidad de los planes productivos en el tiempo por medio de un modelo de optimización para cada escenario. La aplicación de esta metodología permite construir planes mineros alternativos, los cuales son contingentes al cambio de precio, permitiendo establecer criterios de ejecución o parada de los mismos en un horizonte determinado, generando el máximo valor del negocio y, a la vez, minimizando el riesgo de pérdidas por la incertidumbre económica.

1 Introducción

En el proceso de extracción de recursos no renovables como la minería a cielo abierto, es común que los yacimientos otrora ricos se empiecen a agotar, manifestándose en una disminución de leyes extraídas e implicando una disminución de la productividad, un aumento en el costo del proceso de obtención del producto final y un aumento en la inversión para mantener la producción.

Por otra parte, la rentabilidad de una operación minera está determinada por una serie de variables, donde el precio de venta del metal principal (commodity) es una de las que más incide: es una variable exógena que tiene asociada una alta incertidumbre, por lo que predecir su valor en el mediano y largo plazo es prácticamente imposible, incluso en términos promedios, debido a su alta volatilidad conforme pasa el tiempo.

Una operación minera que enfrente al mismo tiempo un incremento de sus costos e inversión, junto con la volatilidad del precio de venta del commodity está en una situación de riesgo que compromete tanto la rentabilidad económica como la solvencia financiera. Una forma en que se puede manejar el riesgo y la incertidumbre es a través de la incorporación de flexibilidad en el proceso de planificación: esto quiere decir, encontrar las mejores formas en las cuales una operación minera se pueda adaptar y hacer frente a los cambios en el precio del commodity.

1.1 Desventajas de la planificación minera tradicional en minas a cielo abierto

El proceso tradicional de planificación de la producción en minas a cielo abierto en el largo plazo es un proceso determinístico y secuencial, que consiste en definir parámetros técnico-económicos, con los cuales se determina: el pit final y pits anidados, que servirán para definir las fases, luego elaborar un diseño operativo de la mina y establecer la extracción en el tiempo de fases-banco, definir leyes de corte, entre otros. Por último, se realiza una evaluación económica que determina la rentabilidad de la operación minera.

Una de las críticas más recurrentes al proceso de planificación está en la etapa de definición de parámetros técnico-económicos, debido a que se asumen fijos y conocidos de antemano muchos parámetros que son inciertos en la realidad, entre los que destaca el precio de venta del commodity, el cual es crítico porque la rentabilidad es altamente sensible a pequeños cambios en su valor.

La etapa de determinación de fases o pushbacks tiene el objetivo de determinar cuáles porciones de reserva se extraerán de manera secuencial, estableciendo precedencias de extracción entre grandes porciones del yacimiento. La práctica habitual es determinar, a través de un análisis paramétrico de sensibilización de pits anidados, cuáles serán las fronteras de las fases (Lerchs & Grossmann, 1965). El problema con esta metodología es que la elección particular de las fases depende fuertemente de los criterios y experiencia propia del planificador, y tampoco se considera el tiempo en su determinación. En esta área han surgido algunos esfuerzos en unificar criterios y generar herramientas que seleccionen de forma óptima las fases, por ejemplo: Elkington & Durham (2011), Jélvez et al. (2016), Jélvez & Morales (2017).

Posterior a la elección de fases se debe elegir en qué momento del tiempo y a qué destino se enviará cada bloque, usualmente con el fin de maximizar el VAN. Si bien hay muchos enfoques, éstos se pueden clasificar en: (i) aquellos que toman la decisión por cada bloque, y (ii) aquellos que agrupan o “agregan” bloques en conjuntos más grandes, sobre los cuales se toma la decisión. En esta etapa es obligatorio que se defina una capacidad de mina y una alimentación a planta, la que generalmente es fija a lo largo de la vida de la mina. En un marco de referencia determinista, con parámetros de entrada fijos, es posible determinar una capacidad mina y planta que maximice el VAN, sin embargo, es válido preguntarse si esta capacidad es “óptima” cuando varía el precio del commodity.

1.2 Flexibilidad: una manera de manejar la incertidumbre del precio del producto.

En este trabajo se entenderá la flexibilidad de un proyecto minero como una característica que permite adaptarse a los cambios, en particular, en las condiciones de mercado. De este modo, un proyecto flexible podrá adaptarse ante variaciones del precio del commodity. Los primeros trabajos en considerar flexibilidad frente a la incertidumbre de precios en minería fueron en el área de opciones reales (Brennan & Schwartz, 1985) y buscaban evaluar económicamente la inversión en un yacimiento minero.

Posteriormente algunos investigadores como De Neufville et al. (2005) buscaron una manera de simplificar el cálculo del valor económico de un proyecto con flexibilidad a través de un enfoque más “ingenieril”, haciendo una transición desde técnicas analíticas del mundo financiero hacia formas de cálculo más prácticas. Finalmente, se han desarrollado metodologías que buscan determinar el diseño óptimo de la infraestructura minera combinando simulación de Montecarlo y modelos de optimización que deciden qué opciones de diseño construir y ejercer, para un escenario determinado (Groeneveld et al. 2011, 2012).

Cabe mencionar que la flexibilidad está siempre presente en el proceso de toma de decisiones, sólo que depende de la experiencia del personal a cargo y es una respuesta natural ante el cambio en las condiciones que dieron origen a un plan (Cardin et al., 2008). Sin embargo, dado que el negocio minero es complejo, ejercer flexibilidad de forma improvisada no logra corregir una situación riesgosa o, en caso contrario, aprovechar oportunidades que se susciten. Por esto último, se deben planificar algunos tipos de flexibilidades, es decir, contar con decisiones contingentes “what-if”.

La capacidad de un proyecto minero de adaptarse a los cambios en los precios del producto es un comportamiento que es observado en la realidad. En efecto, cuando los precios de los productos bajan, las compañías mineras recortan sus gastos e inclusive disminuyen su capacidad de producción en algunos casos. Por el contrario, cuando el precio sube, las empresas tratan de aprovechar la oportunidad y aumentan la producción, por lo que, según el tamaño de la compañía, ésta trata de hacer frente a los precios flexibilizando tanto como sea posible la capacidad de sus procesos.

En general, una compañía puede tomar la decisión de elegir una capacidad fija a través del tiempo y posiblemente expandir esa capacidad con el objetivo de generar un plan minero robusto: este enfoque desde el punto de vista de la optimización entrega buenos resultados y en ciertas compañías con un activo minero importante y solvencia financiera funciona bien. Sin embargo, existe un grupo no menor de compañías (pequeña y mediana minería) que tal vez no puedan o no quieran asumir pérdidas que superen cierto grado de endeudamiento y que, considerando que un yacimiento es un recurso no renovable, es preferible postergar la extracción del recurso minero a operar en pérdida.

1.3 Concepto de opción

Para incorporar la flexibilidad en un proyecto minero, es necesario introducir el concepto de opción. Un ejemplo: flexibilizar la capacidad mina y planta requiere que éstas puedan cambiar en el tiempo para adaptarse a las condiciones de mercado, esto se puede lograr fácilmente en el caso de la capacidad mina, disminuyendo o aumentando el número de equipos en la mina. La capacidad planta se puede flexibilizar al añadir un chancador en caso de aumentar y en caso contrario no saturar la capacidad del chancador, entre otras maneras.

Si consideramos que la capacidad de mina o planta es flexible, se puede afirmar que se tiene “la opción” de aumentar o disminuir esta capacidad. El concepto de opción es muy amplio y puede dar un significado preciso: en este trabajo se usará la palabra opción para describir la elección de una capacidad mina o planta en un periodo determinado.

Se entiende que la capacidad tanto mina como planta está determinada en buena parte por la infraestructura que la soporta, por ejemplo, en caso de capacidad mina, el número de camiones y palas, y en caso de la capacidad planta, por el tamaño de la misma.

Operar con una infraestructura determinada tiene asociado una serie de costos, dentro de los cuales los más destacables son la inversión en adquirir e instalar esa infraestructura (CAPEX), así como el costo que conlleva operarla (OPEX).

1.4 Valor en Riesgo (VaR)

El VaR (Valor en Riesgo, o Value at Risk) es un indicador de riesgo que puede ser aplicado a proyectos, mide la pérdida económica o potencial máximo que puede ocurrir en un determinado horizonte de tiempo con un nivel de significancia determinado (Johnson, 2001). El indicador VaR es compatible con un enfoque de opciones porque ambos sostienen que las variables riesgosas evolucionan en el futuro según un proceso estocástico (Lamothe et al., 2008), pudiendo aplicar modelos no paramétricos tales como simulación Montecarlo para calcular su valor en tiempos futuros. La diferencia más notable entre los enfoques basados en Opciones y en VaR es que el primero busca cuantificar el valor que agrega la flexibilidad a un proyecto, mientras que el segundo trata de dar una medida de riesgo.

Para proyectos, una de las mejores formas de calcular el VaR es mediante simulación (Lamothe et al., 2008). Para ello, se generan de forma aleatoria series de precios del commodity en el tiempo t , denotados por P_t , de acuerdo a una función de distribución. En base a cada uno de estos valores se calcula un VAN, construyendo en conjunto una distribución de VAN. Para cierto nivel de confianza $\alpha \in (0,1]$ se aproxima el VaR.

Pronósticos del precio del commodity

El precio del commodity puede ser representado mediante modelos estocásticos, dentro de estos últimos los que tienen más aceptación para generar realizaciones o escenarios de precios en el tiempo son el Movimiento Geométrico Browniano (Dixit & Pindyck, 1994) y el Proceso de Reversión de la Media (Sabour & Dimitrakopoulos, 2007). La simulación del precio del commodity se hará según el siguiente modelo (Gravet, 2003):

$$P_{t+\Delta t} = P_t * e^{\left(\left(\alpha - b - \frac{\sigma^2}{2} \right) + \sigma * \varepsilon * \sqrt{\Delta t} \right)} \quad (1)$$

donde P_t es el precio del metal en el tiempo t , α es la tasa libre de riesgo, b es el retorno por conveniencia instantáneo, σ es la desviación estándar de los retornos, Δt es el time-step determinado y ε es una muestra de la distribución normal estándar.

1.5 Planificación de contingencias

Dentro de un buen plan minero en el largo plazo, debe haber dos características (Hustrulid & Kutcha, 2006):

- Examinar apropiadamente los méritos económicos de alternativas de producción de mineral y escenarios de leyes de corte.
- Someter a prueba la estrategia propuesta de minado, selección de equipos y plan de desarrollo mina a planificaciones de contingencia “what-if” antes de que se haga el compromiso.

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo, se decidirá en qué periodo se ejecutará cada opción y se optimizará un escenario por cada simulación del precio, por lo que con esto se puede obtener como resultado una tabla que muestra la frecuencia de ejecución de una opción, como se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1 Probabilidad de ejecución de una opción por cada escenario

Periodo	1	2	3	4	5	6
Opción 1	20%	15%	10%	20%	20%	5%
Opción 2	30%	20%	20%	10%	30%	30%
Opción 3	15%	10%	20%	5%	20%	10%
Opción 4	10%	30%	5%	30%	10%	15%
Opción 5	20%	5%	30%	20%	15%	20%
Opción 6	5%	20%	15%	15%	5%	20%

Para elaborar los planes alternativos se usará el criterio de ranking, según el cual se pondrán en el primer plan alternativo las opciones con más probabilidad de ejecución, en el segundo plan las segundas opciones más probables, y así sucesivamente. Si existen opciones que tienen la misma probabilidad de ocurrencia, se generará un plan alternativo adicional.

2 Metodología

En este trabajo se considerará solamente la flexibilidad en las capacidades mina y planta. La metodología presentada en este trabajo se detalla de manera secuencial a continuación:

1. Realizar el plan minero optimizado de manera tradicional (caso base)
2. Simular el precio de commodity
3. Proponer diferentes capacidades alternativas de planta y mina
4. Optimizar las diferentes capacidades mina y planta como opciones al cambio en el precio del commodity
5. Elaborar posibles planes alternativos

En primer lugar, se realiza un plan minero de la manera tradicional, debido a que es de suma importancia tener un caso base con el cual comparar el resultado de la metodología propuesta y analizar si es pertinente su aplicación. Luego se modela y simula el precio de venta del commodity: se debe ser enfático en mencionar que en esta metodología no se propone un modelo en específico, quedando en libertad el usuario de implementar el modelo que más le parezca pertinente. Lo importante es que pueda usarse una técnica Montecarlo para generar múltiples realizaciones de series de precios en el tiempo y luego poder calcular el VaR del plan tradicional o caso base.

Proponer diferentes capacidades es establecer opciones para flexibilizar el plan, se debe tener presente que junto con definir capacidades de cada opción se debe también establecer el costo de operación, así como si es necesario una inversión previa al ejercer dicha opción.

Una vez definidas las opciones que se pueden elegir se ingresan a un modelo de optimización, el cual entrega dos outputs relevantes: (i) el VAN del plan, incorporando las opciones, y (ii) un reporte que describe qué opciones y en qué periodos fueron ejercidas. Es muy importante mencionar que deben hacerse múltiples ejecuciones del modelo, tantas como realizaciones de la simulación se tengan, debido a que en cada realización el modelo se debe optimizar con una nueva serie de precios.

Antes de elaborar los planes de contingencia o alternativos se debe calcular un nuevo VaR, en base a los VAN obtenidos del modelo de optimización. Es intuitivo pensar que incluir opciones más allá de sumar valor a un proyecto pueda disminuir el riesgo del mismo, por lo tanto, tendría sentido elaborar planes alternativos si es que se aprecia que la metodología es efectiva para disminuir el riesgo o aumentar el valor del proyecto. La elaboración de los planes alternativos se hará en un horizonte de tiempo de cinco años, debido a que podría no tener sentido pensar alternativas en un largo plazo debido a la combinatoria resultante, restando valor práctico a la metodología.

2.1 Modelo de optimización

2.1.1 Notación

Sea B un modelo de bloques, por ejemplo, representando el pit final y b representa un bloque. T representa el horizonte de planificación y t un periodo anual. Se tienen L opciones y l representa una de esas opciones. El pit final es particionado en J fases y K bancos, donde cada fase es representada por j y cada banco por k . El número de bloques dentro de una fase-banco viene dado por N_{jk} .

Sea P_t el precio del commodity en el tiempo t . CV es el costo de venta. CP_l el costo de procesamiento y CM_l el costo de mina, ambos según la opción l . El costo de inversión al ejecutar la opción l viene dada por INV_l . La ley y tonelaje del bloque b vienen dados por Ley_b y Ton_b , respectivamente. Finalmente, RM representa la recuperación metalúrgica, r la tasa de descuento y f un factor de conversión de unidades apropiado.

2.1.2 Variables de decisión

Las variables del modelo vienen dadas por:

XE_{bt} = % del bloque b extraído en el tiempo t .

XP_{bt} = % del bloque b procesado en el tiempo t .

Y_{jkt} = 1 si fase-banco jk es extraída completamente en el tiempo t . 0 en otro caso.

Z_{lt} = 1 si la opción l es ejecutada en el tiempo t . 0 en otro caso.

TE_{lt} = Tonelaje extraído por la opción l en el tiempo t .

TP_{lt} = Tonelaje procesado por la opción l en el tiempo t .

2.1.3 Función objetivo

La función objetivo consistirá en maximizar el VAN del proyecto, donde:

$$VAN = \text{Ingresos} - \text{Costo de extracción} - \text{Costo de procesamiento} - \text{Inversión}$$

$$\text{Ingresos:} \quad \sum_b \sum_t \frac{1}{(1+r)^t} \cdot (P_t - CV) \cdot RM \cdot f \cdot Ley_b \cdot Ton_b \cdot XP_{bt} \quad (2)$$

Costo de extracción:

$$\sum_t \sum_l \frac{1}{(1+r)^t} \cdot CM_l \cdot TE_{lt} \quad (3)$$

Costo de procesamiento:

$$\sum_t \sum_l \frac{1}{(1+r)^t} \cdot CP_l \cdot TP_{lt} \quad (4)$$

Inversión:

$$\sum_t \sum_l \frac{1}{(1+r)^t} \cdot INV_l \cdot Z_{lt} \quad (5)$$

2.1.4 Restricciones

Se establece que el porcentaje de un bloque extraído debe ser a lo más 100%

$$\sum_b XE_{bt} \leq 1 \quad \forall b \quad (6)$$

No se puede procesar más de lo que se extrae:

$$XP_{bt} \leq XE_{bt} \quad \forall b, t \quad (7)$$

Para que una fase-banco sea completamente minada, deben haber sido extraídos todos los bloques que se encuentran dentro de esta fase-banco:

$$N_{jk} \cdot \sum_{s \leq t} Y_{jks} \leq \sum_{b \in j \cap k} \sum_{s \leq t} XE_{bs} \quad \forall j, k, t \quad (8)$$

Cada opción tiene asociada una variable de decisión, la cual limita la cantidad de toneladas extraídas desde la mina en cada periodo:

$$\sum_b Ton_b \cdot XE_{bt} \leq \sum_l TE_{lt} \quad \forall t \quad (9)$$

Para que se pueda extraer un bloque de una fase-banco, se debe haber extraído completamente la fase-banco anterior:

$$XE_{bt} \leq \sum_{s \leq t} Y_{j,k} - 1, s \quad \forall j, k, t, b \in j \cap k \quad (10)$$

Se establece la capacidad de mina de cada opción y en cada periodo, que será activada si la opción respectiva es ejecutada:

$$TE_{lt} \leq CM_l \cdot Z_{lt} \quad \forall l, t \quad (11)$$

Solamente se puede minar completamente una fase-banco una sola vez:

$$\sum_t Y_{jkt} \leq 1 \quad \forall j, k \quad (12)$$

Cada opción tiene asociada una variable de decisión, la cual limita la cantidad de toneladas procesadas en cada periodo:

$$\sum_b Ton_b \cdot XP_{bt} \leq \sum_l TP_{lt} \quad \forall t \quad (13)$$

Solamente una opción pueda ser ejercida por periodo:

$$\sum_l Z_{lt} \leq 1 \quad \forall t \quad (14)$$

Se establece la capacidad planta de cada opción y en cada periodo:

$$TP_{lt} \leq CP_l \cdot Z_{lt} \quad \forall t, l \quad (15)$$

3 Caso de estudio

El caso de estudio propuesto en este trabajo sobre una operación minera ficticia que dispone de una infraestructura ya definida y requiere saber si es conveniente flexibilizar su capacidad dentro de un set de capacidades mina, esto puede ser traducido en elegir el tamaño de la flota de camiones dentro del pit. Para ello, se consideró el modelo de bloques KD disponible en la librería MineLib (Espinoza et al., 2012), el cual se compone de 14,153 bloques en total.

Inicialmente se determina un plan minero de manera tradicional: se determina el pit final y se establecen fases de extracción que definen la secuencia de explotación con un precio base de 2.5 USD/lb con un horizonte de planificación de 6 años, a una tasa de descuento de 10% anual. De manera preliminar, se define una capacidad mina de 2,100 kton/año y una capacidad planta de 700 kton/año.

Las simulaciones de precios futuros dentro del horizonte se realizaron según (1), con parámetros $\alpha = 2\%$, $b = 2.5\%$, $\sigma = 15\%$ y 10 periodos. Se realizaron 50 simulaciones del precio (Figura 1), donde para cada una de ellas se evalúa el plan minero tradicional. Producto de cada simulación se obtuvo una distribución de VAN, resultando tener este plan en general una distribución normal $N(64.9 * 10^6, 22.8 * 10^6)$ y un VaR con un nivel de significancia 5% de $22.5 * 10^6$, es decir, en el 5% de los peores casos la utilidad será de 22.5 millones.

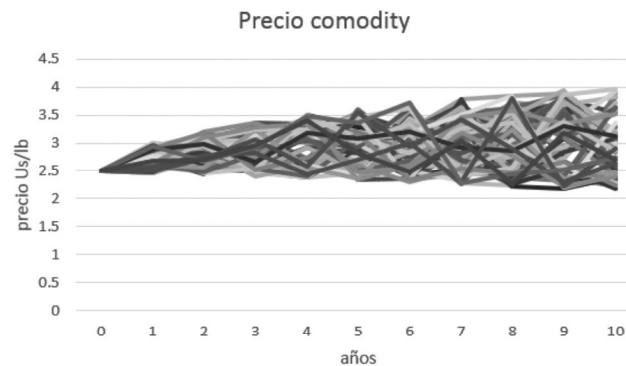


Figura 1 Simulación de precios del cobre

Planes alternativos

Cada opción tiene sus propios costos y en algunos casos inversiones necesarias para poder implementar tal capacidad. En este trabajo se parametrizó los costos mina y planta según capacidad (tpa), teniendo en consideración que a medida que crece la capacidad, los costos por tonelada disminuyen debido al efecto escala.

En este caso se considerarán solo 6 opciones como se resume en la Tabla 2:

Tabla 2 Parámetros opciones caso de estudio 1

Opciones	1	2	3	4	5	6
Cap. Mina (Kton)	2,100	1,900	1,700	1,500	2,300	2,500
Cap. Planta (Kton)	700	700	700	700	700	700
Costo mina (USD/t)	1.5	1.51	1.52	1.53	1.49	1.48
Costo planta (USD/t)	10	10	10	10	10	10
Inversión (MUSD)	-	-	-	-	200	400

Se ha realizado optimizaciones considerando opciones para cada una de las simulaciones de precio, resultado de ello es una distribución de $N(68.9 * 10^6, 21.0 * 10^6)$ y un VaR de $36.6 * 10^6$. De nuevo, en el 5% de los peores casos la ganancia será de 36.6 millones. Vemos que se produjo un aumento de la peor ganancia respecto al caso base.

Según lo entregado por el modelo de optimización por cada simulación de la frecuencia en la cual se han ejecutado cada una de las opciones es:

Tabla 3 Frecuencia ejecución de opciones caso 1

Opción/periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	10%	0%	15%
2	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	30%	66%	0%
3	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	40%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	14%	24%
5	83%	4%	2%	0%	10%	8%	80%	60%	0%	21%
6	0%	95%	97%	100%	89%	85%	16%	0%	20%	0%

Aplicando un criterio de ranking según las opciones más frecuentes se podría armar posibles planes o escenarios productivos de acuerdo de las variaciones del precio de commodity.

Tabla 4 Elaboración de planes alternativos caso 1

plan/periodo	1	2	3	4	5
1(>80%)	Opción 5	Opción 6	Opción 6	Opción 6	Opción 6
2(>12%)	Opción 1	Opción 6	Opción 6	Opción 6	Opción 6
3(>10%)	Opción 1	Opción 6	Opción 6	Opción 5	Opción 6

De la tabla anterior se puede apreciar que el plan alternativo más frecuente (sobre un 80% de frecuencia) contempla ejercer la opción 5 en el primer periodo y en periodo siguiente la opción 6.

Según se observa, la opción 6 es ejercida mayoritariamente mientras que otras opciones no son ejercidas en los primeros 5 periodos (opción 3 y opción 4) por lo que es válido preguntarse por incluir otro tipo de opciones para saber si cambiaría la configuración de los planes alternativos como el valor del VaR. Las nuevas opciones a decidir son:

Tabla 5 Parámetros opciones caso de estudio 2

Opciones	1	2	3	4	5	6
Capacidad mina (Kton)	2,100,000	2,900,000	2,700,000	1,500,000	2,300,000	2,500,000
Capacidad planta (Kton)	700,000	700,000	700,000	700,000	700,000	700,000
Costo mina (USD/ton)	1.5	1.46	1.47	1.53	1.49	1.48
Costo planta (USD/ton)	10	10	10	10	10	10
Inversión (MUSD)		600,000	800,000		200,000	400,000

El resultado de la evaluación en el plan es una distribución $N(72.3 * 10^6, 21.2 * 10^6)$ y un VaR de $37.5 * 10^6$. Una vez más la inclusión de planes alternativos produjeron que el peor caso aumentara su ganancia a 37.5 millones.

Por otra parte, los planes alternativos de esta optimización resultaron en:

Tabla 6 Frecuencia ejecución de opciones caso 2

Opción/periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0%	0%	0%	0%	2%	0%	2%	4%	4%	6%
2	98%	100%	98%	98%	96%	94%	94%	90%	92%	90%
3	2%	0%	2%	2%	2%	2%	4%	2%	4%	0%
4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	2%
5	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%

Aplicando un criterio de ranking según las opciones más frecuentes se podría arman posibles planes o escenarios productivos de acuerdo de las variaciones del precio de commodity.

Tabla 7 Elaboración de planes alternativos caso 2

plan/periodo	1	2	3	4	5
1(>90%)	Opción 2	Opción 2	Opción 2	Opción 2	Opción 2
2(>2%)	Opción 1	Opción 2	Opción 2	Opción 2	Opción 2
3(>2%)	Opción 1	Opción 3	Opción 4	Opción 1	Opción 2

Según se aprecia de la tabla anterior que la opción 2 es mayoritariamente ejercida conformando un plan alternativo por sobre el 90% de frecuencia frente a otros planes con otras opciones que apenas superan el 2% como mínimo.

3 Análisis de resultados

Uno de los aspectos más importantes a resaltar en este trabajo están el efecto en el valor y riesgo de un proyecto al incluir flexibilidad, lo cual se puede apreciar en la Figura 2, donde se aprecia una diferencia entre las distribuciones de utilidades de los distintos planes anteriormente mencionados. Dentro de los aspectos más relevantes están que el beneficio medio subió cerca de 6.2% y 11.4% para los planes que consideraban opciones en comparación con el plan tradicional sin opción y la desviación estándar disminuyó en un 3.9% y 7.0% para los planes con opción comparándola con un plan sin opción. Calculando el VaR para cada plan similarmente se obtiene que éste sube un 62.6% y 66.6% para cada plan con opción en comparación con el plan tradicional sin opción, lo que implica una disminución del riesgo (hablando en términos generales) de potenciales pérdidas que podría sufrir el proyecto.

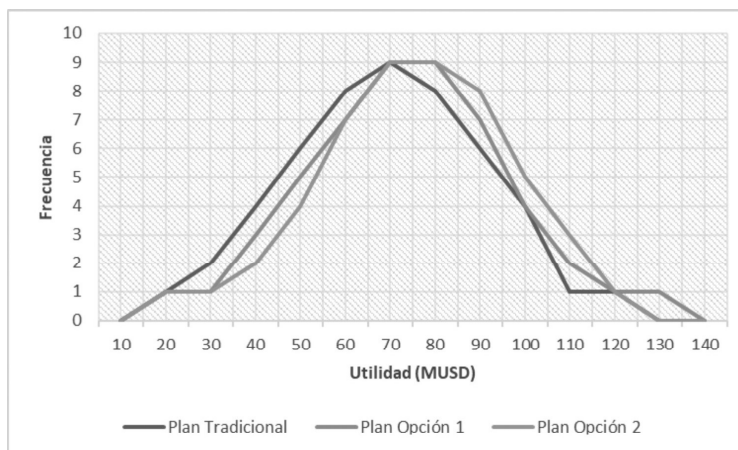


Figura 2 Distribución de utilidades

4 Conclusiones

Este trabajo ha abordado la aplicación de flexibilidad a la optimización en el agendamiento de una extracción minera a cielo abierto por medio del concepto de opción. El foco de este trabajo estuvo en dos ejes principales, el primero es investigar si introducir opciones tiene efecto en disminuir el riesgo de un proyecto minero considerando incertidumbre de precios y en segundo lugar es lograr generar planes mineros alternativos que sirvan de contingencias a la variación del precio de venta del commodity. Para ello se ha ideado una metodología que incluye un modelo de optimización entero-mixto para determinar el agendamiento de una explotación a cielo abierto y simulación Montecarlo para modelar la incertidumbre del precio. Este trabajo ha logrado determinar que incluir flexibilidad de capacidades mina logra agregar valor a un proyecto y disminuir el riesgo de este. Por otra parte la generación de planes alternativos se ha considerado dentro de un plazo de 5 años de acode con un tipo de planificación mediano plazo, dentro de este marco se ha descubierto que dentro de los primeros periodos de tiempo siempre hay una opción que se ejerce mayoritariamente en contraposición a otras aunque esto no se puede afirmar de manera general a todos los casos de estudios por lo que podría ser más adecuado considerar un enfoque robusto para horizontes de tiempo de mediano y corto plazo mientras que en largo plazo un enfoque flexible podría ser más adecuado con los objetivos más estratégicos que se propone.

Referencias

- Brennan, M. J., Schwartz, E. S. (1985). Evaluating natural resource investments. *Journal of Business*, 58(2), pp. 135–157.
- Cardin, M. A., De Neufville, R. and Kazakidis, V. (2008). A process to improve expected value of mining operations, *Min. Technol.*, 117(2), pp. 65–70.
- De Neufville, R., Scholtes, S. and Wang, T. (2005). Real options by spreadsheet: parking garage case example. *J. Infrastruct. Syst.*, 12(2), pp. 107–111.
- Dimitrakopoulos R., Abdel Sabour S.A. (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference? *Resources Policy* 32(3), pp. 116–125.
- Dixit, A.K., Pindyck, R.S., (1994). *Investment Under Uncertainty*. Princeton University Press, New Jersey.
- Elkington, T., Durham, R. (2011). Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization. *Journal of Mining Science*, 47(2), pp. 177-190.
- Gravet, M. (2003). Valoración de opciones reales mediante simulación: el método de los mínimos cuadrados. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Groeneveld, B., Topal, E. (2011). Flexible open-pit mine design under uncertainty. *Journal of Mining Science*, 47(2), pp. 212-226.
- Groeneveld, B., Topal, E. y Leenders, B. (2012). Robust, flexible and operational mine design strategies. *IMM Transactions, Mining Technology*, 121(1), pp. 20-28.
- Hustrulid, W., Kutch, M. y R.K., Martin. (2013). *Open pit mine planning and design* (Vol. 1). CRC Press.
- Jélvez, E., Morales, N. (2017). A MIP-based procedure to pushback selection. In *proceedings 37th APCOM Conference*, Golden, Colorado, EEUU.
- Jélvez, E., Morales, N. y Askari-Nasab, H. (2016). A new model for pushback selection. In *proceedings 5th International Seminar on Mining Operations*, Santiago, Chile.
- Johnson, C. (2001). Value at Risk: Teoría y Aplicaciones. *Estudios de Economía*, Vol. 28, No. 2, pp. 217-247.
- Lamothe, P., Contreras, E. (2008). Metodologías basadas en VaR para el análisis de riesgo en proyectos de embalses. *Revista ingeniería de Sistema*, Vol. 22, pp. 82-104
- Lerchs, H., Grossmann, I.F. (1965). Optimum Design of open-pit mine, *Transaction on CIM* LXVII, pp. 47-54