

# IMPLEMENTACIÓN BAJO INCERTIDUMBRE DE MERCADO DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN LERCHS-GROSSMANN EN DEPÓSITOS DE CARBÓN

## IMPLEMENTATION UNDER UNCERTAINTY MARKET OPTIMIZATION ALGORITHM LERCHS-GROSSMANN IN COAL DEPOSITS

WILLY CORZO LINARES

*Ingeniero de Minas y Metalurgia, Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación en Planeamiento Minero, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, wjcorzol@unal.edu.co*

GIOVANNI FRANCO SEPÚLVEDA

*Doctor (c) en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Profesor Departamento de Materiales y Minerales, líder del Grupo de Investigación en Planeamiento Minero, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia, gfranco@unal.edu.co.*

Recibido para evaluación: 10 de Septiembre de 2012 / Aceptación: 03 de Mayo de 2013 / Recibida versión final: 02 de Julio de 2013.

**RESUMEN:** En el presente trabajo se muestra una metodología para la implementación del algoritmo de optimización de Lerchs – Grossmann en un depósito de carbón bajo incertidumbre del precio en el mercado. La metodología consiste en realizar diferentes simulaciones con el algoritmo de optimización de Lerchs – Grossmann, variando el precio del mineral en cada una de estas simulaciones, escogiendo los precios necesarios para realizar las simulaciones en el ciclo económico anterior al actual. Se realizó un análisis económico para cada una de las simulaciones con el objetivo de encontrar las reservas explotables y el valor presente neto (VPN).

**PALABRAS CLAVES:** Incertidumbre, Mercado, Lerchs – Grossmann, Planeamiento a largo plazo, Carbón.

**ABSTRACT:** This paper shows a methodology for implementing the optimization algorithm Lerchs - Grossmann in a coal deposit under uncertainty in the price in the market. The methodology consists in make different simulations with optimization algorithm Lerchs - Grossmann, varied ore price in each of these simulations, choosing the price needed to perform the simulations in the current cycle before. Economic analysis was performed for each of the simulations with the aim of finding exploitable reserves and the net present value (NPV).

**KEYWORDS:** Uncertainty, market, Lerchs - Grossmann, Long-term planning, Coal.

### 1. INTRODUCCIÓN

El negocio minero es uno de los negocios con mayor grado de incertidumbre debido a que está sujeto a variables que no son posibles controlar o conocer con precisión, cómo se comportan los precios en el mercado, las reservas a explotar, la calidad del mineral, los costos de producción, la estabilidad geotécnica de la excavación, la disponibilidad de los equipos, el clima, entre otras. (Tonkin, 2011) (Martinez, 2011).

Todas estas variables afectan de una u otra manera la eficiencia y eficacia de la operación viéndose reflejado en los bajos niveles de producción y en la disminución de las ganancias.

Dentro del marco del planeamiento minero a largo plazo estas variables afectan en mayor medida el diseño final del pit, y el tamaño y la forma de este es dependiente del precio en el mercado y la distribución de mineral de interés, con base a este se definen las reservas explotables dentro del proyecto minero.

En la actualidad el desarrollo en paquetes informáticos como lo son MineSight, Whittle, Surpac, Minex, Cae Mining, Maptek Vulcan, UPL, Milawa, entre otros. (Franco & Gallo, 2011) ayudan a hacer el trabajo del ingeniero encargado del planeamiento minero más fácil ya que por medio de estos programas es posible realizar simulaciones basándose en los algoritmos de optimización (Cono Flotante y Lerchs – Grossmann) dando a conocer una posible configuración del pit final.

Para la implementación adecuada de los algoritmos de optimización es necesario conocer datos referentes del proyecto (Datos de entrada), el grado de incertidumbre en algunas de estas variables es alto, debido a la falta de conocimiento del depósito o por factores externos que no son posibles controlar.

Las variables necesarias para la ejecución de los algoritmos de optimización son: precio de venta, costo de minado, costo de procesamiento, recuperación de la operación, calidades del mineral, costos de transporte entre bancos, destinos y ángulo final de la explotación.

La mayor parte de estas variables pueden ser calculadas con modelos de costos, análisis técnicos de los procesos metalúrgicos y mineros, mientras que el precio del mineral en el mercado es una variable dinámica a través del tiempo y no se puede conocer el valor preciso a lo largo de la vida útil de la mina. Lo que quiere decir que la forma y tamaño del pit es cambiante a través de la vida del proyecto, esto podría hacer incurrir en mayores costos de explotación, disminuyendo la rentabilidad del proyecto.

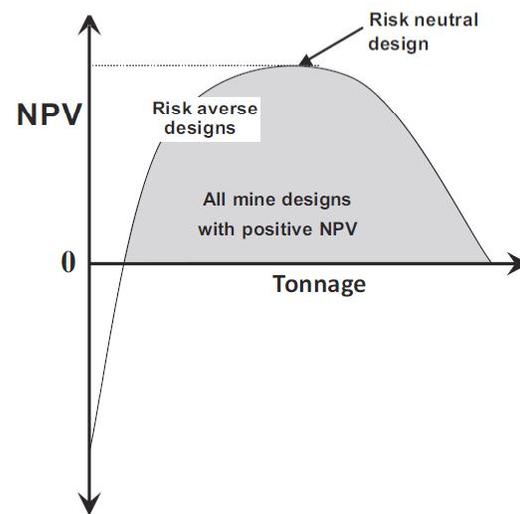
Autores como Akbari *et al*, 2009, basándose en que la estimación de reservas es la clave para encontrar el VPN en un proyecto minero y en que el factor más importante en la estimación de reservas es el precio del mineral y debido a que las fluctuaciones en el precio de los minerales en los recientes años fueron exageradas e imponen un alto grado de incertidumbre en la estimación de reservas por lo que se ve afectado el proceso de planeamiento minero. Este autor hace una amplia revisión de las metodologías para la determinación del pit final encontrando que las metodologías existentes no tienen en cuenta la incertidumbre de los precios en el mercado para determinar el límite del proyecto, exceptuando el procedimiento planteado por Whittle en 1998 con su software Whittle 4D, en el que se pueden generar una serie de pits óptimos para condiciones económicas diferentes, considerando así la incertidumbre en el precio.

Pero aun así, este método no es suficientemente confiable, debido a que esta técnica considera un intervalo de precios con una tolerancia del  $\pm 20\%$ . Esta tolerancia comparada con la variación de los precios en el mercado no es suficiente ya que se han dado casos en los que el precio del mineral aumenta aproximadamente un 400% en un lapso de tiempo relativamente corto. Por lo tanto se

propone que el “Enfoque de opciones reales ROA (de sus siglas en inglés Real Option Approach)” es un método de decisión en mercados en condiciones de incertidumbre.

Hall 2009, presenta un modelo para la validación de las optimizaciones realizadas con paquetes de software, basando en la validación de la optimización con el manejo de los datos, la elección de estrategias para la solución de problemas (elección del ángulo del pit final, elección del pit óptimo, ancho mínimo de minado, omisión de áreas en la que se dificulta la operación, vías de transporte, variación del secuenciamiento) y la exploración de soluciones alternativas. La metodología para la selección del pit final se basa en la investigación realizada por Whittle y que es utilizada en el software Whittle 4D.

En la Figura 1, se muestran las diferentes opciones económicamente viables del diseño final del pit. Desde la extracción de la máxima cantidad de reservas económicamente explotable, hasta el diseño en el cual posee el riesgo mínimo y la mínima rentabilidad. La metodología planteada por Whittle consiste en realizar una serie de simulaciones variando parámetros económicos, obteniendo una serie de pits económicamente óptimos.



**Figura 1:** Representación gráfica de la toma de decisiones sobre la relación toneladas de mineral/VPN. (Fuente: Hall, 2009)

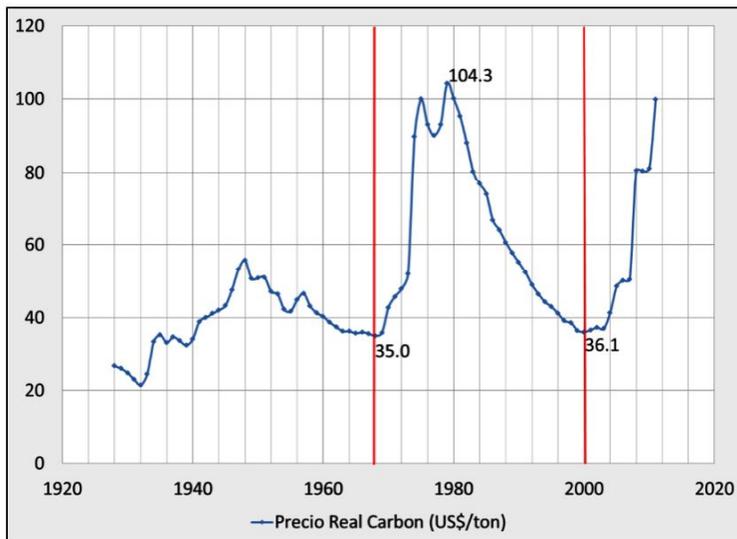
Posteriormente esta serie de pits son evaluados con el objetivo de encontrar el diseño que maximice el VPN, es decir, el punto en el que la curva tiene un valor máximo. En este punto se encuentra en equilibrio la

viabilidad económica y el riesgo en el que incurre el inversionista (Hall, 2009).

## 2. METODOLOGÍA

Se seguirá la metodología implementada por Whittle, la cual consiste en generar una serie de pits pero en este

caso no se harán variaciones con un porcentaje  $\pm 20\%$ . Se tendrá en cuenta lo citado por Akbari, ya que las variaciones en el precio superan este porcentaje llegando a ser aproximadamente 400% para algunos commodities. Por lo tanto se harán las simulaciones con base al ciclo económico del precio real del carbón anterior al actual.

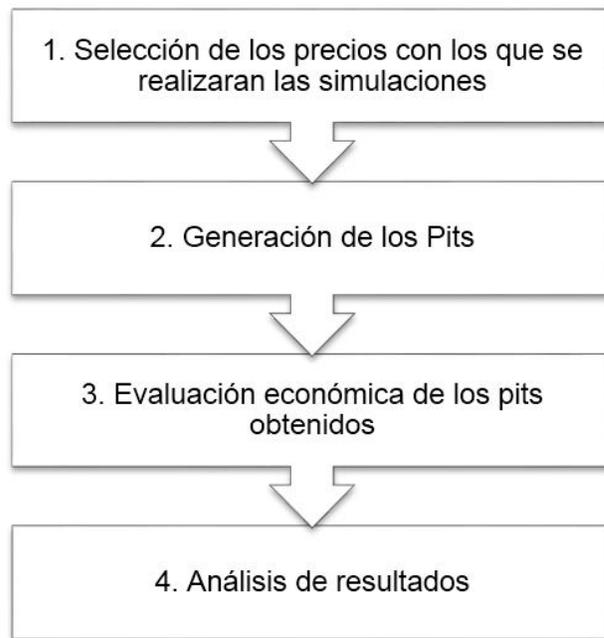


**Figura 2:** Histórico de los precios del carbón reales ajustados a 2012 entre los años 1928 y 2011.

Autores como Cashin *et al*, 2002, han estudiado los precios de los commodities a través de la historia, encontrando que todos estos poseen ciclos y estos ciclos se repiten a través del tiempo. Por lo tanto, identificar los ciclos para el carbón dará una mejor aproximación de los valores con los cuales se deben hacer las simulaciones para encontrar el pit óptimo que represente el equilibrio entre la rentabilidad económica y el riesgo del mercado.

En la Figura 2 se presenta un histórico del comportamiento del precio del carbón entre los años 1928 y 2011, donde se señala el ciclo anterior al actual. El análisis no se hace con el ciclo actual ya que el precio del mineral no ha llegado al punto máximo se estima que el punto más alto de este ciclo será más alto que el pasado debido al aumento de la demanda que se tiene hoy en día en comparación con la demanda que se tenía en el ciclo económico pasado.

En la Figura 3 se observa de manera resumida la metodología a implementar para la definición de un pit óptimo.



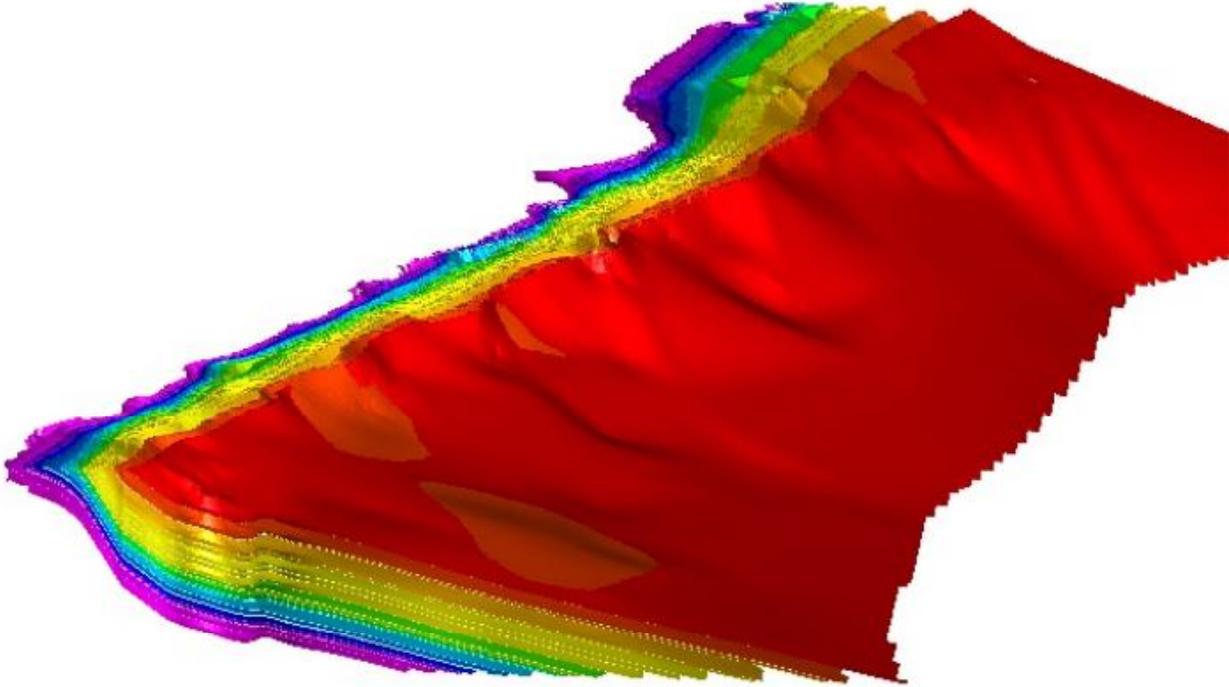
**Figura 3:** Flujo de trabajo para la selección de un pit óptimo.

### 3. DATOS DE ENTRADA

Se realizará el análisis sobre un yacimiento de carbón. Para la generación de los pit óptimos son necesarios

los siguientes datos:

i. Un modelo geológico con la información sobre la distribución y calidades del depósito (Figura 4).



**Figura 4:** Modelo geológico

ii. Parámetros económicos y técnicos referentes al proyecto. (Tabla 1)

**Tabla 1:** Parámetros económicos y técnicos para la ejecución del algoritmo de optimización.

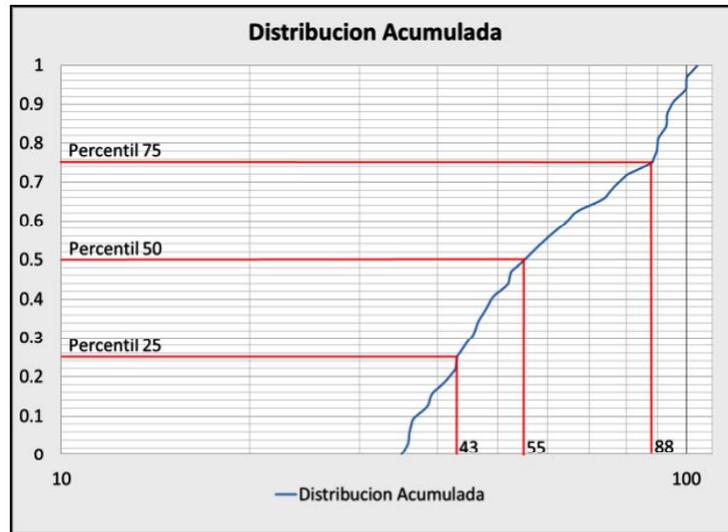
Parámetros	Valor
Costo de minado del carbón	US\$ 4/ton
Costo de minado del estéril	US\$ 2/ton
Costo de procesamiento del carbón	US\$ 2/ton
Densidad específica del carbón	1.3 g/cm <sup>3</sup>
Densidad específica del estéril.	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Porcentaje de recuperación	95%
Inclinación de la pared del pit.	45°
Producción anual (Mton/año)	2.5

El precio del mineral será la variable económica con la que se realizarán los diferentes escenarios, para escoger el intervalo de precios representativos se realiza un estudio estadístico de los precios del anterior ciclo.

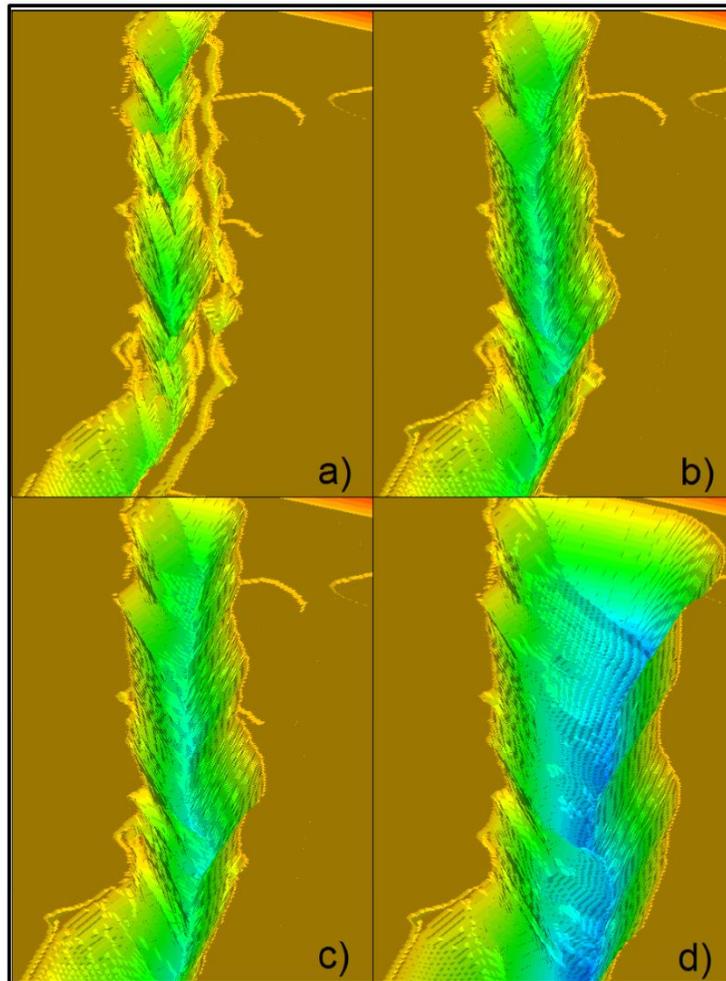
Se tomaron los percentiles 25 (US\$ 43/ton) y 75 (US\$ 88/ton) como escenarios pesimistas y optimistas respectivamente, estos precios tienen una probabilidad de ocurrencia del 25% y el escenario esperado está representado por el percentil 50 (US\$ 55/ton) el cual tiene una probabilidad de ocurrencia del 50%. (Figura 5)

### 4. DATOS DE SALIDA

Los resultados de las simulaciones son diferentes escenarios. En la Figura 6 se observan los escenarios representativos (Escenario pesimista, esperado, óptimo y optimista).



**Figura 5:** Distribución acumulada de los precios del carbón.



**Figura 6:** Pits óptimos obtenidos a partir de las simulaciones realizadas. a) Escenario pesimista, b) Escenario esperado, c) Escenario óptimo, d) Escenario optimista.

En la Figura 7 se muestra una vista en sección en la que se puede observar como el tamaño y forma de los pit

cambia a medida de que el precio del mineral aumenta.

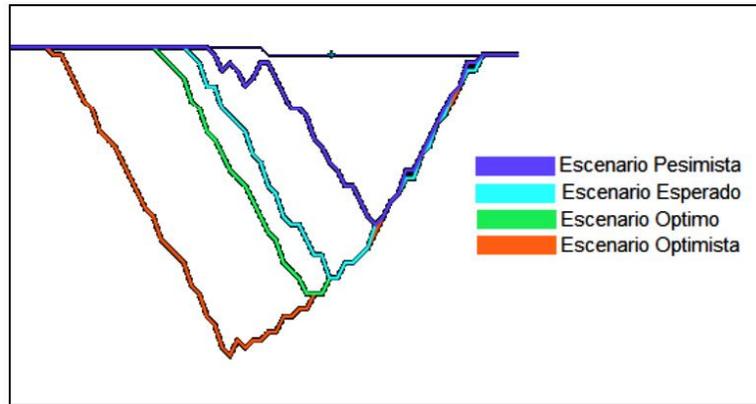


Figura 7: Vista en sección de los 4 escenarios representativos.

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se obtuvieron 45 pits óptimos y estos fueron evaluados por medio del programa MSVALP (MineSight Economic Planner) al precio de US\$ 98/ton (precio actual).

Los datos de interés en esta evaluación fueron, las reservas explotables de cada uno de los pit óptimos y el valor presente neto acumulado para cada pit. Con estas dos variables se construye la Figura 8.

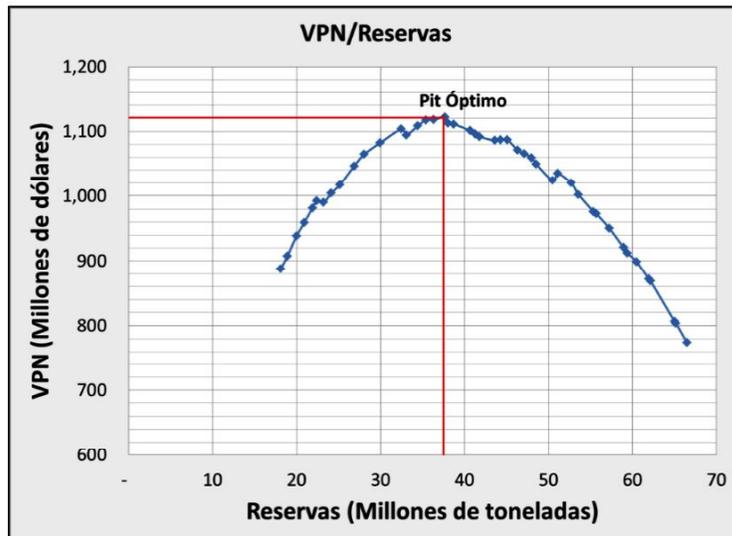


Figura 8: Relación VPN/Reservas.

En la Figura 8 se puede analizar que a medida que se extrae una mayor cantidad de reservas la rentabilidad del proyecto aumenta hasta llegar a un máximo global, este punto en la gráfica es considerado como el diseño económico óptimo ya que maximiza la rentabilidad del proyecto y minimiza el riesgo en el retorno de la inversión.

A partir de este punto la curva comienza a decrecer, esto es producido por el hecho de que se extrae material que se encuentra a una mayor profundidad con respecto al material extraído por los pits anteriores. Para extraer material que se encuentra a una mayor profundidad se debe extraer una cantidad adicional de material estéril, que hace que la rentabilidad del proyecto disminuya significativamente.

El pit óptimo encontrado corresponde a la simulación con el precio de US\$ 60/ton, como se puede observar en la Figura 8 posee el máximo valor presente neto dentro del conjunto de simulaciones realizadas.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la evaluación económica de los diferentes escenarios.

**Tabla 2:** Resultados evaluación económica de los 4 escenarios representativos.

Escenario	Reserva (Mton)	VPN (Millones US\$)	Vida Útil (años)
Pesimista	18	887.5	8
Esperado	32.5	1.103.4	13
Óptimo	37	1.121.8	16
Optimista	66	773.8	27

En la Tabla 2 se puede observar que a medida que el tamaño de los escenarios aumenta, el VPN y la vida útil aumentan hasta llegar al escenario óptimo. A partir de este punto la rentabilidad decae y la vida útil sigue en ascenso.

Como se menciono anteriormente, la rentabilidad decae por el hecho de remover una cantidad mayor de estéril y debido a que en los primeros periodos del proyecto la recuperación de carbón es mínima por la alta relación de descapote que se encuentran en la operación, debido a esto los flujos de caja en los periodos iniciales son pequeños en comparación con los flujo de caja de los otros escenarios, ya que, el dinero pierde su valor en el tiempo, aunque el escenario optimista tenga una vida útil 11 años mayor larga que el escenario óptimo encontrado las ganancias en estos periodos no tienen un aporte significativo en el VPN.

## 6. CONCLUSIONES

A. Una simulación determinística con un precio fijo no es suficiente para escoger el pit final, ya que la incertidumbre en el mercado u otras variables en el negocio minero hacen que a esta simulación se le dificulten la definición de pit final óptimo. Las múltiples simulaciones y la evaluación de estas permiten escoger un diseño óptimo, hacer de una manera adecuada la estimación de reservas y la evaluación del proyecto en la etapa de pre-factibilidad.

B. El diseño óptimo encontrado con el precio de US\$ 60/ton maximiza la rentabilidad del proyecto, los diseños que tienen un tamaño mayor que el diseño óptimo poseen una mayor cantidad de reservas explotables pero al ser estos diseños de un mayor tamaño incurren en mayores costos relacionados con la remoción de material estéril. Debido a este aumento en los costos de minado la rentabilidad del proyecto disminuye.

C. Las técnicas actuales de optimización son complejas y cada día su aplicabilidad aumenta, debido al cambio constante de las variables de entrada y al alto grado de incertidumbre al que se encuentra asociado el depósito mineral.

D. El algoritmo de optimización de Lerchs – Grossmann permite conocer el tamaño, forma, reservas explotables y beneficio neto del pit, ya que, este algoritmo tiene como función objetivo maximizar el beneficio neto. Pero este no considera la variación del precio a través del tiempo y la incertidumbre asociada al mercado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Akbari, A., Osanloo, M., & Shirazi, M. (2009). Reserve Estimation of an open pit mine under price uncertainty by real option approach. *Mining Science and Technology*, 709-717.
- Cashin, P., McDermott, C., & Scott, A. (2002). Booms and slumps in world commodity prices. *Journal of Development Economics*, 277 - 296.
- Franco, G., & Gallo, A. (2011). Modelo de bloques para un yacimiento de sulfuros Masivos utilizando el software MineSight. *Boletín Ciencias de la Tierra No 30*, 5-14.
- Hall, G. (2009). The Need for Validation of Optimisation Solutions in Mine Design. *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 119 - 123.
- Martinez, L. A. (2011). Designing, Planning and Evaluating a Gold Mine Project Under In Situ Metal Grade and Metal Price Uncertainties. *Advances in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 225-234.
- Tonkin, C. (2011). Advancing Strategic Mine Planning - A Software Perspective. *Advances in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, 135-140.

