
PLANEAMIENTO DE MINAS A CIELO ABIERTO MEDIANTE OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA

PLANNING OF OPEN PIT MINES THROUGH STOCHASTIC OPTIMIZATION

Giovanni Franco Sepúlveda, John Willian Branch Bedoya & Patricia Jaramillo Álvarez

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín
gfranco@unal.edu.co, jwbranch@unal.edu.co, gpjarami@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 31 de Octubre de 2011 / Aceptación: 10 de Mayo de 2012 / Recibida versión final: 10 de Junio de 2012

RESUMEN

Los procesos de planificación minera en los depósitos a cielo abierto en Colombia, se han realizado utilizando herramientas deterministas, que excluyen la evaluación de riesgos y las incertidumbres del negocio minero y en algunos casos dejan de maximizar los beneficios en términos monetarios.

Es necesario desarrollar modelos alternativos de planificación minera que mejoren las condiciones de competitividad y productividad en términos de los siguientes factores: Aumento de la vida de la mina – LOM; Extracción y explotación de recursos de menor calidad; Obtención de mayores beneficios del negocio minero; Disminución del riesgo y la incertidumbre del proceso de planificación minera, entre otros.

Dentro de los procesos de planificación minera de los yacimientos minerales a cielo abierto en Colombia no hay evidencia de la utilización de herramientas para la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre que permiten llevar a cabo estos procesos con técnicas meta heurísticas tales como recocido simulado; algoritmos genéticos; búsqueda tabú; redes neuronales, entre otros. En este trabajo se hace énfasis en los algoritmos genéticos y su aplicación a los procesos de planificación minera para explotaciones a cielo abierto.

Se pretende que este trabajo sirva de base para realizar una aproximación al planeamiento minero estocástico, desde los algoritmos genéticos, y que su aplicación se lleva a cabo en las empresas que explotan los recursos minerales en Colombia, con el objetivo de mejorar la cadena productiva del proceso minero.

PALABRAS CLAVE: Planeamiento minero estocástico; Algoritmos genéticos; Colombia

ABSTRACT

Mine planning processes in open-pit deposits in Colombia, have been performed using deterministic tools, which excludes the assessment of risks and uncertainties in the mining business and in some cases fail to maximize the benefits in monetary terms.

We need to develop alternative models for mine planning to improve the competitiveness and productivity in terms of the following factors: Increased mine of life- LOM; Extraction and exploitation of lower quality resources; Obtaining more benefits from the mining business; Reduced risk and uncertainty in the mine planning process, among others.

Within the planning processes of mineral mining in the open pit mine in Colombia there is no evidence of the use of tools for decision making under uncertainty scenarios that allow these processes to perform metaheuristic techniques such as simulated annealing; genetic algorithms; tabu search; neural networks; among others. In this paper we focus on genetic algorithms and its application to mine planning for open pit.

This paper is intended to serve as the basis for a stochastic approach to mine planning, from the genetic algorithm and its implementation is carried out in companies that exploit the mineral resources in Colombia, with the aim of improving the production chain mining process.

KEYWORDS: Stochastic mine planning; Genetics algorithms; Colombia

1. INTRODUCCIÓN

En las actuales explotaciones de recursos minerales el diseño y planeamiento minero se lleva a cabo utilizando técnicas determinísticas que conllevan a procesos mineros en los cuales se dejan de explotar o producir una cantidad considerable de recursos minerales, que traen como consecuencia niveles de producción inadecuados desde el punto de vista tecnológico; financiero; social y ambiental (Abdel, 2010; Dimitrakopoulos, 2007). Es por esto que un adecuado diseño y planeamiento minero utilizando herramientas de optimización estocástica logrará en el corto, y largo plazo incrementar la productividad y competitividad de dichas explotaciones, que redundará en una explotación sostenible (en términos técnicos, económicos, sociales y ambientales) y en la generación de nuevos empleos en las regiones donde se lleven a cabo estos procesos productivos.

Adicionalmente, la planeación minera tiene como finalidad la obtención de la mejor proyección del uso de los recursos minerales disponibles, y además que es una actividad capaz de ajustarse a eventuales cambios en el transcurrir del tiempo; se puede afirmar que la planeación minera es la gestora del presente y futuro de la actividad minera. Dicha actividad minera posee un componente operacional llamado Planeación de Producción; El éxito de esta planeación dependerá de poder alcanzar un Valor Presente Neto (VPN) óptimo que genere factibilidad al proyecto a desarrollar. Llegar a dicho valor lleva a que la actividad sea a veces difícil y compleja (Bastante, 2004; Hustrulid, 2006).

Con el fin de obtener los resultados esperados en el planeamiento minero, se tienen dos métodos de seguimiento del buen desempeño. El primer método son las técnicas de simulación con la cual basados en datos conocidos se generan una cierta cantidad de hipótesis a las que se les realiza un análisis y se empiezan a trabajar. La importancia del uso de las técnicas de simulación en minería está enmarcada por el hecho de que se puede lograr una reducción de costos y de tiempo en algunas actividades, la disminución de riesgos a la hora de la toma de decisiones y la posibilidad de elaborar un modelo de simulación que pueda aproximarse a la realidad. Y el segundo método, es la optimización que tiene como base un plan ya estipulado o basarse en las simulaciones ya realizadas. Su objetivo principal es realizar las mejoras que sean pertinentes para no equivocarse el camino de los objetivos planteados. En la actualidad, la optimización de la planeación, las aproximaciones utilizadas para estimación de reservas y cálculo de la producción mineral resultan imprecisas (Arias, 2008). Es válido tener en cuenta que esta incertidumbre ha disminuido con la definición y el establecimiento de normas internacionales para la estimación de recursos mineros, como es el caso de la norma The JORC CODE (Hustrulid, 2006)

La planeación minera tradicional estima los cuerpos minerales por medio de modelos simples, los cuales no permiten observar la variabilidad e incertidumbre asociada a este. Por lo anterior, conseguir una mejor aproximación en cuanto a las reservas de un depósito, producción de mineral y mejoramiento de la planeación contribuirá con el objetivo principal de todo proyecto minero que será alcanzar el mayor VPN posible (Morales, 2010).

Por lo anterior, dentro de los procesos de diseño y planeamiento minero de las explotaciones a cielo abierto en Colombia se evidencia la necesidad de utilizar herramientas para la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre que permitan realizar dichos procesos con técnicas meta heurísticas tales como recocido simulado; algoritmos genéticos; búsqueda tabú; redes neuronales, entre otros (Askari-Nasab, 2010; Castro, 2010; Dimitrakopoulos, 2009).

2. MÉTODOS

La metodología para desarrollar este trabajo se establece teniendo en cuenta que el proceso de planeación en minería es básicamente un problema de optimización, que puede ser resuelto mediante: Programación lineal; Programación entera o Programación estocástica (Dimitrakopoulos, 2010; King, 2009; Xu, 2009).

Programación Lineal: Un problema de programación lineal es un problema de optimización en donde todos los parámetros son exactamente conocidos y determinísticos y las relaciones entre variables en la función objetivo y las restricciones son lineales. El método comúnmente utilizado para resolver estos problemas es el SIMPLEX.

Programación Entera: Son problemas en los cuales algunas o todas las variables deben ser enteras. Existen varios métodos de solución de problemas utilizando programación entera, estos son: Branch and Bound; Cutting Planes; Branch and Cut y Meta heurísticos.

Programación Estocástica: Es una técnica de optimización usada cuando los problemas envuelven incertidumbre (como en nuestro caso, la incertidumbre asociada a lo geológico; el mercado y los precios). Dicha incertidumbre puede representarse por medio de distribuciones de probabilidad o a través de posibles escenarios.

Como el objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para la planeación óptima de la explotación minera en explotaciones a cielo abierto considerando la incertidumbre asociada a variables de interés, con el fin de maximizar los beneficios esperados y minimizar los riesgos asociados, para el desarrollo de este trabajo se utilizaran elementos tanto de programación entera como de programación estocástica.

A continuación en la figura 1, se presenta la clasificación de algunos algoritmos meta heurísticos como lo son: Genetic Algorithm (GA); Simulated Annealing (SA); Ant Colony Optimisation (ACO) y otros, que servirán de base para realizar una aproximación al planeamiento minero estocástico.

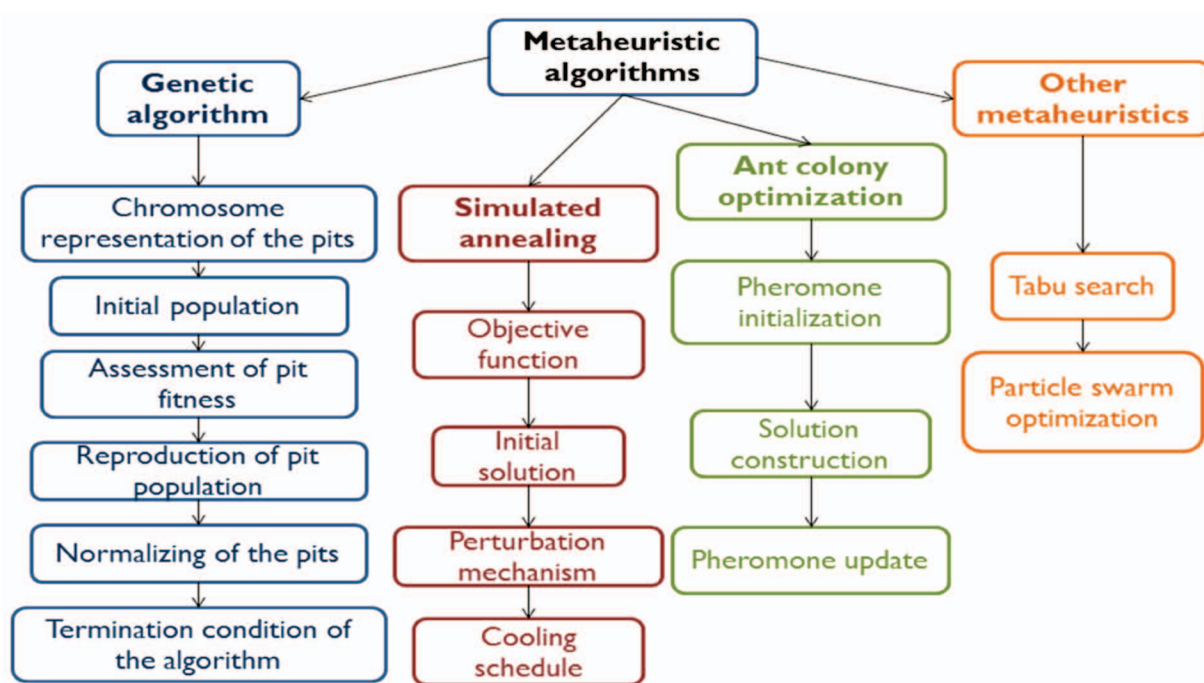


Figura 1. Clasificación de algoritmos meta heurísticos. Fuente: Modificado de Sattarvan 2008.

Se propone utilizar esta herramienta meta heurística de los GA sobre las demás, dadas las particularidades que se tienen en el planeamiento minero de explotaciones a cielo abierto en Colombia, específicamente las relacionadas con los depósitos de origen sedimentario que explotan recursos como el carbón. Adicionalmente, para futuros trabajos se pueden utilizar los demás algoritmos meta heurísticos aplicando su desarrollo en diferentes tipos de explotaciones de recursos minerales, como lo pueden ser: Oro; Ferróníquel; Calizas; Esmeraldas; entre otros.

Teniendo como base en la figura anterior el algoritmo meta heurístico del GA, se muestra en la figura 2 la metodología general para la aplicación del GA para el proceso de planeamiento minero de a un yacimiento mineral para una explotación a cielo abierto.

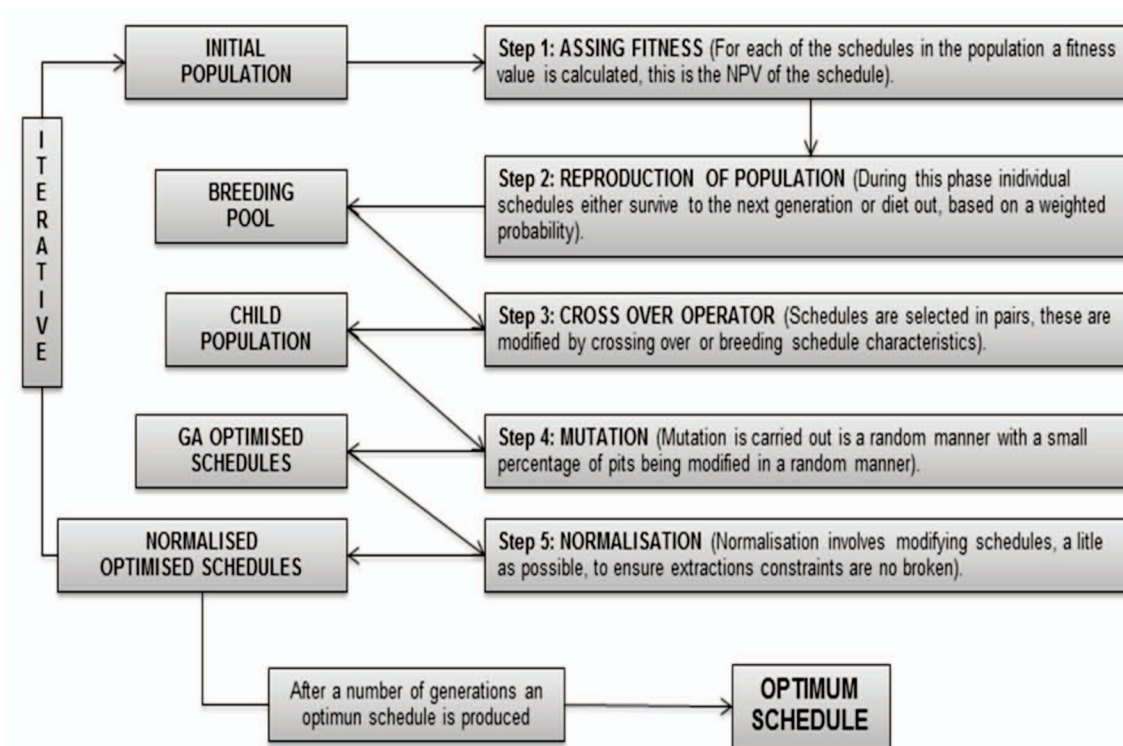


Figura 2. Proceso de planificación de la producción minera a cielo abierto mediante algoritmos genéticos. Fuente: Modificado de Sattarvan 2008.

De la figura 2 se puede observar que un algoritmo genético es un procedimiento de búsqueda que imita el funcionamiento de la selección natural y genética. Comienza con la búsqueda de una población de soluciones aleatorias y desarrolla esta población con una serie de generaciones mediante la aplicación de técnicas de probabilidad. Realiza esta operación con dos grandes procesos cruce (crossover) y mutación (mutation). Algunos autores como Denby y Schofield (1995) han utilizado este algoritmo de optimización GA en los procesos de planeamiento minero de una explotación a cielo abierto, demostrando que la principal ventaja de este método es la capacidad de resolver problemas de forma simultánea de planificación de Ult

3. PROBLEMA

El diseño y planeamiento minero de las explotaciones a cielo abierto, se ha llevado históricamente a cabo mediante técnicas y herramientas determinísticas, que permiten maximizar el VPN del negocio minero, dejando de lado los riesgos e incertidumbre del mismo.

En los actuales procesos de diseño y planeamiento minero, los modelos de optimización estocástica de las explotaciones mineras a cielo abierto, se presentan como una herramienta que permitirá determinar la forma de extraer los bloques de mena y estéril de un yacimiento mineral, maximizando los beneficios y minimizando el riesgo y la incertidumbre (Tulcanaza 1999; Haimés; 2008; Abdel, 2007).

En la Figura 3, se muestra un esquema del modelo de optimización estocástica que se desarrollará en este trabajo el cual consta de tres componentes principales: El modelo matemático; el modelo minero y el modelo computacional. Los tres modelos anteriores convergen en el problema a investigar: El diseño y planeamiento minero mediante minería a cielo abierto, que para el énfasis de este trabajo, se refiriere a la forma de extraer los bloques de mineral (O) y estéril (W) de un depósito de carbón maximizando los beneficios y minimizando el riesgo y la incertidumbre propias del negocio minero.

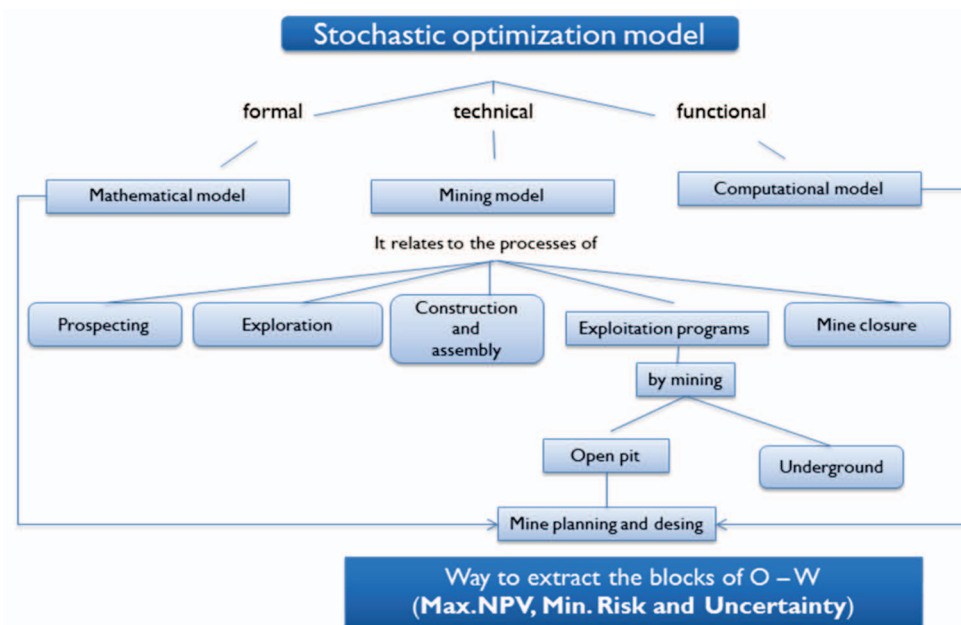


Figura 3. Esquema del modelo de optimización estocástica

Teniendo en cuenta la Figura 3, vale la pena realizar las siguientes preguntas:

- Teniendo en cuenta el agotamiento de los recursos minerales de buena calidad, ¿de qué forma se pueden realizar diseños y planeamientos mineros que mitiguen el impacto que tiene la explotación de reservas marginales y al mismo tiempo aumenten las reservas probadas del mineral de interés?
- De acuerdo con las metodologías existentes para el proceso de diseño y planeamientos minero, ¿cómo tienen en cuenta o evalúan el riesgo y la incertidumbre para lograr un incremento en la life of mine?
- Asumiendo que los planes de producción minera se llevan a cabo con técnicas determinísticas (v.g. Programación lineal), ¿Es factible mediante técnicas meta heurísticas, llevar a cabo el diseño y planeamiento minero de una explotación de carbón a cielo abierto con el objetivo de aumentar el NPV del negocio minero?
- Conforme al desarrollo del sector minero, con especial énfasis en los modelos financieros y económicos, ¿Puede la incertidumbre crear oportunidades y valor al negocio minero?

4. CONCLUSIONES

A continuación se describen algunas conclusiones de este trabajo:

- Los modelos de simulación y optimización que mejoran la planeación minera óptima, que incorporen la incertidumbre asociada a las principales variables, y que permiten simultáneamente maximizar los beneficios asociados, contribuyen a minimizar el riesgo y los impactos negativos asociados.
- Es posible identificar las variables claves y las incertidumbres asociadas a ellas en el proceso de planeación minera estocástica. Así mismo, se debe formular un modelo de optimización bajo incertidumbre que mitigue el riesgo asociado y maximice los beneficios, y demás objetivos que tendrá la planeación minera.
- Se hace necesario para el sector minero colombiano desarrollar un algoritmo de solución al modelo de optimización estocástica mediante la combinación de técnicas de optimización y simulación. Adicionalmente, validar dicho

modelo para la planeación óptima de la explotación minera en depósitos de carbón, mediante la comparación con aproximaciones propuestas en la literatura.

- D. El desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a la estimación de recursos minerales, así como la definición de nuevos algoritmos de optimización de los procesos de planeamiento minero, ha ayudado a disminuir la incertidumbre asociada a todo el ciclo del proceso minero, entendiendo como ciclo desde la definición del modelo geológico hasta la disposición en puerto del recurso mineral explotado.

REFERENCIAS

- Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2010). Mine Design under Geologic and Market Uncertainties. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.
- Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2009). Accounting for Joint Ore Supply, Metal Price and Exchange Rate Uncertainties in Mine Design. Orebody modelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.
- Abdel, S. and Dimitrakopoulos, R., (2007). Evaluating mine plans under uncertainty: can be real option make a difference? OrebodyModelling and strategic Mine Planning. pp 305 - 308.
- Arias, J., Castro, R., et al., (2008). MININ 2008 III International Conference on Mining Innovation. August 6 to 8, 2008. Santiago. pp 498.
- Askari-Nasab, H., Tabesh, M. and Badiozamani, M., (2010). Creating Mining Cuts Using Hierarchical Clustering and Tabu Search Algorithms. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.
- Bastante, F., et al., (2004). Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. Engineering Geology.
- Castro J., et al., (2010). Probabilistic Risk Analysis of Mine Production Plans. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp 534.
- Denby, B., Schofield, D., (1995). Inclusion of Risk Assessment in Open pit Design and Scheduling. IMM Transactions, 104, A67-A71.
- Dimitrakopoulos, R., (2009). Stochastic Mine Planning Optimization: New Concepts, Applications and Monetary Value in an ever Uncertain Market. Cosmo. pp 313 -325.
- Dimitrakopoulos, R., (2010). Stochastic Mine Planning- Optimisation: New Concepts, Applications and Financial Contribution. Minin 2010. pp 173 – 182.
- Haimes, Y., (2008). Risk Modeling, assessment, and management. United States of America, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. pp 1009.
- Hustrulid, W. y Kuchta, M., (2006). Open pit mine planning and design. Taylor & Francis plc., London, UK.
- King, B., (2009). Optimal Mining Principles. Orebody modelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.
- Lerchs, H., Grossmann, I., (1965). Optimum desing of open pit mines. CIM Bulletin 58. pp47-54
- Morales, N. and Rubio, E., (2010). Robust Open-Pit Planning under Geological Uncertainty. MININ 2010 Proceeding of the 4th International Conference on Mining Innovation. June 23 to 25, 2010. Santiago de Chile. pp534.
- Sattarvand, J., Niemann-Delius, C. (2008). Perspective of metaheuristic optimization methods in open pit production planning. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. Vol. 24
- Tomaselli, B., et al., (2009). Pit Optimisation and Mine Scheduling at the Montes Claros De Goiás Nickel Laterite Deposit, Brazil. Orebodymodelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.
- Tulcanaza, E., (1999). Evaluación de recursos y negocios mineros: Incertidumbres, riesgos y modelos numéricos.

Instituto de ingenieros de minas de Chile. pp 350.

Xu, H., et al., (2009). Conditional Simulation of Grades Controlled by Geological Indicators. Orebody modelling and strategic mine planning, Conference Proceedings, AusIMM.