

---

---

# UNA APROXIMACIÓN A LA PLANEACIÓN MINERA A CIELO ABIERTO DESDE UN ENFOQUE BASADO EN DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE

## AN APPROXIMATION TO THE OPEN PIT MINE PLANNING APPROACH BASED ON DECISIONS UNDER UNCERTAINTY

---

---

*Giovanni Franco Sepúlveda<sup>1</sup>, John Willian Branch Bedoya<sup>2</sup> & Patricia Jaramillo Álvarez<sup>3</sup>*

*1. Profesor, GEMMA: Grupo de estudios en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente.*

*2. Profesor, GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial. Facultad de Minas.*

*3. Profesora, Laboratorio de Análisis y Modelamiento Territorial LAMAT. Instituto de Sistemas y Ciencias de la Decisión*

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

Recibido para evaluación: 19 de Febrero de 2010 / Aceptación: 4 de Octubre de 2010 / Recibida versión final: 5 de Noviembre de 2010

### RESUMEN

En este artículo se presenta en primer lugar una descripción del proceso de planeamiento minero desde un punto de vista clásico y su relación con los actuales procesos de planeamiento minero que tienen como base la optimización en sus diferentes etapas. Seguidamente, se realiza un acercamiento a los procesos de planeación minera a cielo abierto desde un enfoque basado en decisiones bajo incertidumbre. Por último, se lleva a cabo un análisis crítico de los artículos encontrados clasificándolos en cinco categorías: Modelamiento geológico; Planeamiento minero; Evaluación financiera; Decisiones bajo incertidumbre y modelos de optimización.

**PALABRAS CLAVES:** Decisiones bajo incertidumbre; Planeación minera; Minería a cielo abierto; Riesgo.

### ABSTRACT

This article first presents a description of the mine planning process from a classical view and its relation to existing mine planning processes that are based on optimization in its various stages. Then be made an approach to planning processes open pit mining from an approach based on decisions under uncertainty. Finally, it performs a critical analysis of the items found divided into five categories: geological models, mine planning, financial evaluation, decisions under uncertainty and optimization models.

**KEY WORDS:** Decisions under uncertainty; Mine planning; Open pit mine; Risk.

## 1. INTRODUCCIÓN

La optimización de las explotaciones mineras a cielo abierto, es en la actualidad, una herramienta que le permite a las diferentes empresas explotadoras de los recursos minerales aumentar la vida de sus diferentes proyectos mineros, explotar recursos minerales de menor tenor, incrementar las reservas probadas del mineral de interés, obtener utilidades mayores, entre otros. Lo anterior se da como una función del planeamiento y diseño minero, teniendo en cuenta que un yacimiento mineral es un negocio (Hustrulid y Kuchta, 2006). Además, como cualquier negocio, un proyecto minero es definido como un portafolio de activos reales en el cual las zonas del depósito mineral delimitados en función de las calidades, localización y dimensiones, asumen el papel de componentes del portafolio (Naranjo, 2005).

Teniendo en cuenta que, la optimización de explotaciones mineras se lleva a cabo, en la mayoría de los casos, mediante la simulación como técnica de muestreo estadístico controlada para calcular el desempeño de sistemas determinísticos y probabilísticos complejos, se aplica cuando los modelos analíticos no son suficientes para explicar un fenómeno o este sea muy complejo (por ejemplo un yacimiento o depósito mineral) para traducirlo en expresiones matemáticas. Los experimentos de muestreo se efectúan sobre el modelo y no en el sistema real porque sería muy costoso y muchas veces imposible de efectuarlo (Ortiz, et al 2007).

Por otro lado, cuando se habla de optimización en cualquier proceso productivo, especialmente en el minero, es necesario tener presente que la gestión de la producción, que en un sentido amplio puede definirse como administrar un sistema de producción, en este contexto, se traduce por disponer en todo momento de un plan de trabajo, representado por una serie de operaciones a realizar en el periodo considerado (Sánchez, 1993). Esta serie de operaciones se presenta cuando existe un proceso de planeación que tienda en todo momento a optimizar el negocio minero. En este sentido, se puede entender por planeación minera (Ortiz, et al 2001) como:

- a. Un proceso de adaptación a los inevitables cambios o ciclos.
- b. Un adelanto al posible futuro.
- c. Un estilo de dirección. Será una actitud mental y laboral más que una técnica.
- d. Una decisión o elección previa.
- e. Una creencia y deseo en hacer algo que sucederá.

Finalmente, para una compañía extractiva, conocer los costos de producción no le reporta información para establecer un precio de venta por estar éste fijado por mercados internacionales. No obstante, le puede resultar útil predecir estos datos a fin de establecer la estrategia óptima, tanto de extracción como de beneficio de mineral. Así pues, la compañía respondería a las preguntas ¿Qué producir?, ¿Cuándo producir? y ¿Cómo producir? atendiendo a las condiciones de mercado, mejorando la rentabilidad del proyecto de viabilidad empresarial trazado y definido a largo plazo (Avilés, 2006).

## 2. APROXIMACIÓN Y DISCUSIÓN

La búsqueda de información relacionada con el proceso de planeación minera a cielo abierto desde un enfoque basado en decisiones bajo incertidumbre se llevó a cabo en bases de datos especializadas en temáticas de ingeniería tales como DOAJ; EBSCO; Science Direct y Springer Link. Las palabras clave que sirvieron para encontrar los artículos para el análisis de este trabajo fueron:

Analytic hierarchy process; Decision making; Economic evaluation; Estimation; Mine production scheduling; Mineral potential modeling; Mining engineering; Mining industry; Mining Optimization; Multicriterion optimization; Net present value; Open pit mine; Optimum cutoff grades; Optmization; Project Risk Management; Quantitative resource assessment; Resource management; Risk analysis; Scheduling; Simulation Analysis; Stochastic optimization; Stochastic orebody models; Strategic planning, entre otras.

Vale la pena destacar que las anteriores palabras clave se asociaron en la mayoría de los casos a los artículos que presentaran las dos características siguientes: En primer lugar, asociados a temáticas de diseño y planeamiento minero y en segundo término, relacionados con la temporalidad, es decir, artículos cuya fecha de publicación se encontrará entre los años 2000 al 2009.

Con base en las principales temáticas encontradas en los diferentes trabajos publicados para la realización de este artículo en los procesos de planeación minera a cielo abierto,

se definen cinco categorías que pueden relacionarse y agruparse para describir el proceso integral de planeación minera a cielo abierto. Estas categorías son:

A. Modelamiento geológico.

B. Planeamiento minero.

C. Evaluación financiera.

D. Decisiones bajo incertidumbre.

E. Modelos de optimización.

Teniendo en cuenta la anterior categorización, es válido que en cuatro de las cinco categorías anteriores se destacan los trabajos de Chinbat (2009 - Categorías B, C, D y E); Dimitrakopoulos y Grieco (2009 - Categorías B, C, D y E); Dimitrakopoulos, Farrelly y Godoy (2002 - Categorías B, C, D y E); Dimitrakopoulos, Martinez y Ramazan (2007 - Categorías B, C, D y E); Komljenovic (2008 - Categorías B, C, D y E); Leite y Dimitrakopoulos (2007 - Categorías A, B, C y D); y Scott, Dimitrakopoulos y Brown (2002 - Categorías A, B, C y D).

En tres de las cinco categorías anteriores, se destacan los trabajos de Asad (2005 - Categorías A, C y E); Ataei, Khalokakaei y Hossieni (2009 - Categorías B, D y E); Bastante, Taboada y Ordóñez (2004 - Categorías A, B y C); Dimitrakopoulos y Abdel (2007 - Categorías B, C y D); Duggan y Dimitrakopoulos (2004 - Categorías A, B, y E); Esfandiari, Bahador y Amir (2004 - Categorías B, D y E); Goodwin, Seron y Mayne (2008 - Categorías A, B, y E); Jeung, Chang Taioun (2006 - Categorías C, D y E); Kazakidis, Mayer y Scoble (2004 - Categorías B, D y E); Nieto y Bascetin (2006 - Categorías A, B, y C); Ortiz et al (2007 - Categorías B, D y E); Qureshi y Dimitrakopoulos (2004 - Categorías A, D, y E); Scott y Dimitrakopoulos (2001 - Categorías A, B, y C); Ta et al (2005 - Categorías A, D, y E); Vargas y Dimitrakopoulos (2003 - Categorías B, D y E); y Yuriy y Vayenas (2008 - Categorías B, D y E).

Seguidamente, tal como se puede apreciar más adelante en la tabla 1, el orden de importancia relativo de las categorías mencionadas, definido con base en el mayor número de veces que cada categoría es citada por los diferentes autores, es en primer lugar la categoría B, el planeamiento minero; seguido por la Categoría D, de las decisiones bajo incertidumbre; en tercer lugar, la Categoría E, los modelos de optimización; en cuarto término, la Categoría C, la evaluación financiera y por último, la Categoría A, el modelamiento geológico. Desde luego, esto no quiere decir, que el modelamiento geológico sea lo menos importante, sino por el contrario que para los autores citados se puede convertir en la base de todo lo relacionado con el proceso integral de planeación minera a cielo abierto.

Adicionalmente, se pueden establecer algunos puntos de partida de lo que es la planeación minera a cielo abierto, desde el punto de vista de las decisiones bajo incertidumbre. El marco de revisión se establece desde la actividad minera propiamente dicha, y esta puede evidenciarse en la Tabla 1.

La información correspondiente a la categorización de la revisión de literatura realizada, se presenta en la Tabla 1, con base en los criterios: (A) Modelamiento geológico; (B) Planeamiento minero; (C) Evaluación financiera; (D) Decisiones bajo incertidumbre y (E) Modelos de optimización. Es válido tener en cuenta, que las observaciones de dicha tabla se realizaron para aquellos artículos que presentan cuatro o más criterios de clasificación.

**Tabla 1.** Categorización de la revisión de literatura para los autores consultados

Autor(es)	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	Observaciones
Asad (2005)	X		X		X	Establece que el efecto de disminución del Valor Actual Neto (VAN) define los tenores de corte dinámico, es decir, los tenores más altos de corte en los primeros años de vida de una mina y los tenores de corte inferior en los últimos años.
Ataei, Khalokakaei y Hossieni (2009)		X		X	X	Utilizando la lógica difusa, determinan que los dos procesos más importantes en las minas de carbón son el mejoramiento de la eficiencia y el incremento de la producción, teniendo en cuenta constantemente la seguridad de los procesos mineros.
Bastante, Taboada y Ordóñez (2004)	X	X	X			Describen la importancia que deben tener las diferentes técnicas con las que se modelan los factores mineros y sus interrelaciones utilizando algoritmos de optimización.
Bozorgebrahimi, Hall y Blackwell (2003)		X				Identifican las variables significativas que deben ser consideradas y sugieren un enfoque para cuantificar su impacto en la mina. El documento propone también una nueva visión para la planificación de minas y selección de equipos con respecto a la sensibilidad del tamaño de los equipos.
Chinbat (2009)		X	X	X	X	Presenta las ventajas de la simulación asistida por computador para un proyecto minero real de optimización.
Dimitrakopoulos y Abdel (2007)		X	X	X		Evalúan los resultados del planeamiento minero bajo condiciones de incertidumbre, comparando las técnicas del NPV – net present value- con ROV – real options valuation, para una mina de oro en Australia.
Dimitrakopoulos y Grieco (2009)		X	X	X	X	Definen como una función del riesgo conceptos desarrollados en la minería a cielo abierto, con ejemplos de utilización de datos de Kidd Creek Mine.
Dimitrakopoulos, Farrelly y Godoy (2002)		X	X	X	X	Establecen dos nuevas implementaciones de la simulación condicional y de la simulación de bloques.
Dimitrakopoulos, Martinez y Ramazan (2007)		X	X	X	X	Definen un nuevo enfoque al diseño de la mina sobre la base de la cuantificación del riesgo y de los criterios de decisión de alternativas estratégicas.
Duggan y Dimitrakopoulos (2004)	X	X			X	Aplican la simulación condicional para cuantificar la incertidumbre y clasificar el agotamiento de un depósito de diamantes en Namibia.
Esfandiari, Bahador y Amir (2004)		X		X	X	
Goodwin, Seron y Mayne (2008)	X	X			X	
Goodwin <i>et al</i> (2006)		X		X		
Jeung, Chang Taioun (2006)			X	X	X	
Kazakidis, Mayer y Scoble (2004)		X		X	X	
Komljenovic (2008)		X	X	X	X	Maximiza tanto el valor actual neto (VAN) de la mina, y la rentabilidad a largo plazo a través de un continuo

En primer lugar, Chinbat (2009), cree que la actividad minera está particularmente sujeta a más riesgos que otras actividades empresariales e industriales, debido a su incertidumbre, complejidad y alto costo. Una de las primeras cosas a considerar antes de iniciar proyectos de minería es el factor de riesgo. Algunos de los riesgos del proyecto pueden ser reducidos en la visualización y la comprensión del proceso antes de su iniciación real. En el mismo sentido, Dimitrakopoulos y Grieco (2009) establecen que el riesgo se cuantifica en términos de la incertidumbre de un diseño convencional: contenidos minerales, tenor y potencial económico. Además, de una nueva formulación probabilística matemática de la optimización del tamaño, ubicación y número de tajos en la presencia de la incertidumbre.

Seguidamente, otro autor como Komljenovic (2008) analiza las posibilidades de desarrollo de un riesgo global, basado en el rendimiento de gestión de activos en la minería (RIPBAMM). Este proceso consistiría en la cuantificación y modelización probabilística como apoyo a la decisión de indicadores de rendimiento en los diferentes procesos de planeamiento minero.

En tercer lugar, otro autor que se destaca por la utilización de nuevas metodologías y herramientas estadísticas y de toma de decisiones bajo incertidumbre - medición del riesgo entre otros - en la planeación minera es Dimitrakopoulos (Leite y Dimitrakopoulos, 2007), él sistematiza y estudia los beneficios de incorporar la incertidumbre geológica en el proceso de programación de operaciones mineras. El enfoque estocástico se centra en generar un programa de LOM - life of mine - con un VPN 26% más alto que el de la programación convencional, es válido tener en cuenta, que el 26% de incremento en el VPN fue para el caso de estudio que se desarrolló en este trabajo, lo cual no implica que va a ser igual para cualquier depósito. Basado en un análisis de riesgo la programación estocástica reduce las desviaciones en las metas de producción cuando se compara con el método convencional.

Por último, teniendo en cuenta a varios autores (Dimitrakopoulos, Martinez y Ramazan 2007) establecen que la gestión de los flujos de efectivo y riesgo durante la producción es una parte crítica de una empresa relacionada con la minería de superficie. Para el yacimiento mineral la incertidumbre es un factor crítico en la planificación estratégica de las minas, la optimización de los diseños de minas y la secuencia de largo plazo. Ya que, los métodos tradicionales de optimización no tienen en cuenta la variabilidad del tenor in situ.

### 3. CONCLUSIONES

A continuación se describen algunas de las conclusiones a las que se llega dentro de esta aproximación a la planeación minera a cielo abierto desde un enfoque basado en decisiones bajo incertidumbre:

1. Teniendo en cuenta la revisión de literatura realizada, se evidencia que existen nuevas metodologías y herramientas matemáticas que ayudan a mejorar el proceso de planeamiento minero en sus diferentes etapas.
2. Los procesos de optimización estocástica que han venido desarrollando investigadores como el Profesor R. Dimitrakopoulos y su grupo de trabajo de la Universidad de Mc Gill, indican la utilidad y aprovechamiento de estas nuevas metodologías en pos de la industria minera propiamente dicha.
3. Se evidencia en la literatura revisada, que herramientas financieras como las opciones reales favorecen - sobre criterios como VPN, TIR, entre otros - en un porcentaje importante los criterios de decisión financiera y económica de los diferentes proyectos mineros.
4. La literatura técnica revisada, se especializa día tras día, en analizar temas que anteriormente no resultaban importantes a la hora de tomar decisiones al momento de invertir en un negocio minero. En la actualidad, ha cobrado mucha importancia el estudio del riesgo (geológico, económico, datos, minero, financiero, entre otros) y sus implicaciones directas e indirectas relacionadas con el mejoramiento de los resultados financieros de los proyectos mineros.

## REFERENCIAS

- Asad, M. W. A., 2005. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. Vol 19, N° 3, pp. 176-187.
- Ataei M, Khalokakaei R, Hossieni M., 2009. Determination of coal mine mechanization using fuzzy logic. *Mining science and technology*. Vol 19, pp. 149-154.
- Avilés, Carmen, 2006. Análisis de la información financiera y analítica de The Rio tinto Company Limited (1873-1954). (Tesis Doctoral). En: *Revista: Spanish Journal of Accounting History*. N° 5.
- Bastante, F.G, Taboada, J. y Ordóñez, C., 2004. Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. *Engineering Geology*. Vol 73, pp. 93-103.
- Bozorgebrahimi, E, Hall, R.A. y Blackwell, G.H., 2003. Sizing equipment for open pit mining - a review of critical parameters. *Mining technology - trans. Inst. Min. Metall*. Vol 112, pp. 171-179.
- Chinbat, U, 2009. Using simulation for reducing risk of a mining optimization project. *International Journal of simul model* 8. Vol 3, pp. 166-177.
- Dimitrakopoulos, R, Farrelly, C. y Godoy, M., 2002. Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design. *Mining Technology*. Vol 11, pp. A82-A88.
- Dimitrakopoulos, R. y Grieco, N., 2009. Stope design and geological uncertainty: quantification of risk in conventional designs and a probabilistic alternative. Vol 45, N° 2, pp. 152-163.
- Dimitrakopoulos, R., Abdel, S., 2007. Evaluating mine plans under uncertainty: can the real options make a difference?. *Resources Policy*. doi:10.1016/j.resourpol.2007.06.003.
- Dimitrakopoulos, R., Martinez, L. y Ramazan, S., 2007. A maximum upside / minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design. *Journal of Mining Science*. Vol 43, N° 1, pp. 73-82.
- Duggan, S. y Dimitrakopoulos R., 2004. Application of conditional simulation to quantify uncertainty and to classify a diamond deflation deposit. *Geostatistics Banff*. Vol. 2, pp. 419-428.
- Esfandiari, B et al., 2004. Open pit optimisation including mineral dressing criteria using 0-1 non-linear goal programming. *Mining technology (trans. Inst. Min. Metall. A)*. Vol 113, A3, pp. 3-16.
- Goodwin, G. C., Seron, M. y Mayne, D., 2008. Optimization opportunities in mining, metal and mineral processing. *Annual reviews in control*. Vol 32, pp. 17-32.
- Goodwina, G.C. et al., 2006. Receding horizon control applied to optimal mine planning. *Automatica*. Vol 42, pp. 1337-1342.
- Hyun Jeung ko, Chang Seong Ko, Taioun Kim. 2006. A hybrid optimization - simulation approach for a distribution network design of 3pls. *Computers & industrial engineering*. Vol 50, pp. 440-449.
- Hustrulid, W y Kuchta, M. 2006. *Open pit mine planning and design*. Taylor & Francis plc., London, UK.
- Kazakidis, V. N., Mayer, Z. y Scoble, M., 2004. Decision making using the analytic hierarchy process in mining engineering. *Mining Technology*. Vol. 113
- Komljenovic, D., 2008. Development of risk-informed, performance-based asset management in mining. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 22, N° 2, pp. 146-153.
- Leite, A y Dimitrakopoulos, R., 2007. Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit. *Mining Technology*. Vol. 116, N° 3, pp. 109-118.

- Naranjo, Ramón, (2005). Modelo de riesgo para la evaluación económico financiera de proyectos mineros. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de ingenieros de minas.
- Nieto, A y Bascetin, A., (2006). Mining cutoff grade strategy to optimise npv based on multiyear grg iterative factor. *Mining Technology*. Vol. 115, N° 2, pp 59-64.
- Ortiz, O., et al. (2007). Simulación determinística y estocástica para dimensionar y seleccionar equipo y elegir alternativas de minado en la explotación minera superficial. *Revista del instituto de investigaciones FIGMMG*. Vol. 10, N° 19, pp 35-50.
- Ortiz, F. et al., (2001). Curso de evaluación y planificación minera. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de ingenieros de minas. Cátedra de Laboreo de Minas.
- Qureshi, S y Dimitrakopoulos, R., (2004). Comparison of stochastic simulation algorithms in mapping spaces of uncertainty of non-linear transfer functions. *Geostatistics Banff*. Vol. 2, pp 959-968.
- Sánchez, A., (1993). Concepción y desarrollo de un sistema de gestión de la producción en una explotación minera a cielo abierto. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Escuela técnica superior de Ingenieros de Minas.
- Scott, M. y Dimitrakopoulos, R., (2001). Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning: implications for australian geological surveys. *Natural Resources Research*. Vol. 10, pp 159-177.
- Scott, M., Dimitrakopoulos, R. y Brown, R., (2002). Valuing regional geoscientific data acquisition programmes: addressing issues of quantification, uncertainty and risk. *Natural Resources Forum*. Vol. 26, pp 55-68.
- Ta, C. H., et al (2005). A stochastic optimization approach to mine truck allocation. *International journal of surface mining, reclamation and environment*. Vol. 19, N° 3, pp 162-175.
- Vargas-guzman, J.A. y Dimitrakopoulos, R., (2003). Computational properties of min/max autocorrelation factors. *Computers & Geosciences*. Vol. 29, pp 715-723.
- Vargas-guzman, J.A. y Dimitrakopoulos, R., (2003). Successive nonparametric estimation of conditional distributions. *Mathematical Geology*. Vol. 35.
- Yuriy, G y Vayenas, N., (2008). Discrete-event simulation of mine equipment systems combined with a reliability assessment model based on genetic algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 22, N° 1, pp 70-83.

