



**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

# Informe de investigación 2009



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Ingeniería de Minas

Patrocinado por



**bhpbilliton**



# Delphos – Laboratorio de Planificación Minera

---

Informe de Investigación 2009

## Prólogo



La principal reflexión del año 2009 en referencia a la Planificación Minera, dice relación al impacto que ésta pueda tener en los costos de producción de una operación minera. En particular, se observó en algunos trabajos de investigación y de transferencia tecnológica de carácter industrial, que la desviación de los planes de producción mineros posee una alta repercusión en el comportamiento del costo. De ahí nace la motivación de re-plantearse, junto a otros investigadores del medio académico, sobre cuáles deberían ser los futuros desafíos de la Planificación Minera y cómo estos deberían contribuir a disminuir la brecha entre lo que se planifica y lo que actualmente se extrae, a través del mejoramiento de las prácticas de Planificación Minera, lo que a su vez permitirá robustecer los planes de producción. Durante los años 2008 y 2009, Delphos ha desarrollado herramientas de Planificación Minera que pretenden resolver de manera integral los problemas constitutivos que se han identificado en la práctica de esta disciplina. Estas herramientas se encuentran en proceso de empaquetamiento en una plataforma computacional ad hoc a la planificación de cada faena minera, denominada CubeMine.

Uno de los desafíos fundamentales que enfrenta hoy la industria con referencia a la Planificación Minera dice relación con la valorización y costeo de los planes de producción, pues no existe hoy una métrica clara para establecer el costo teórico que involucra el plan de producción. Específicamente lo que actualmente se considera costo de un plan minero resulta de la simple operación de dividir el gasto por la producción, y por lo tanto, no considera la confiabilidad de planes, ni la dificultad tecnológica de los diseños o la operación de los equipos. Esto conduce a una curva ascendente de gasto para cumplir cada año las metas de producción establecidas en los programas de producción.

El equipo de investigación Delphos ha concluido que la problemática existente se relaciona con la calidad de los planes de producción mineros, los cuales se llevan a cabo con tecnología de hace 30 o 40 años. En particular, el equipo ha identificado tres grandes problemáticas:

- Falta de integración en el ciclo de toma de decisiones de Planificación Minera. Por ejemplo, los bloques son valorizados previo a la definición de una secuencia, no obstante debemos definir una secuencia previa a calcular un programa de producción. Esta manera desmembrada de tomar decisiones afecta de manera considerable las oportunidades de producción y la flexibilidad que debieran tener los planes de producción para hacer frente a las incertidumbres de mercado, geológica y tecnológica.
- Falta de herramientas que permitan incorporar la mezcla en los modelos de secuenciamiento y programación de la producción. Se ha demostrado que modelos que facilitan mezclar de manera dinámica con la definición de secuencia, logran mejoras sustanciales en el valor del plan de producción.

- Falta o inexistencia de la noción de incertidumbre en el cálculo de programas de producción mineros, en particular la incertidumbre geológica, de mercado y tecnológica. La incorporación de incertidumbre en los modelos de planificación requiere de una redefinición de la manera de cómo se valorizan actualmente los planes de producción mineros, lo que posibilitará de manera coherente incorporar conceptos de confiabilidad y coberturas operacionales. Herramientas de cálculo que faciliten al planificador minero resolver una o todas estas interrogantes le permitirán un acercamiento de mejor manera al cumplimiento de sus planes y por ende a capturar el valor real de sus planes de producción.

Delphos ha delimitado su rol frente a estas problemáticas definiéndose como una unidad académica encargada de delinear las mejores prácticas de la disciplina de Planificación Minera. En esta dirección es que el Laboratorio ha enfocado sus esfuerzos en la construcción de una herramienta de planificación que permita de manera coherente integrar control de producción, programación de la producción y Planificación Minera, resolviendo programas de producción holísticos y multivariados bajo incertidumbre. Esta integración no es trivial y requiere de cálculo intensivo que hoy día no es posible llevar a cabo en un computador personal. Es por eso que la herramienta ha sido concebida y diseñada para operar en un ambiente de computación paralela, lo que a su vez permite integrar una gran cantidad de datos, realizar simulaciones y optimizaciones de manera simultánea en el cálculo de un programa de producción minero. La herramienta desarrollada corresponde a la primera versión de CubeMine: computador para la Planificación Minera que se adapta a cada faena. Así por ejemplo, una de las consolas de CubeMine, BOS2, es capaz de calcular soluciones coherentes que podrían ser utilizadas en la mina Spence para la planificación de los quarters y forecast. Esta misma consola ha sido adaptada para incorporar restricciones medioambientales y también para el secuenciamiento y diseño de minas de sublevel stoping.

Las soluciones entregadas por BOS2 difieren de las tradicionales, lo cual induce a pensar que debemos implementar geometrías de excavación distintas a las existentes, es decir, incorporar la perforación y tronadura como una herramienta estratégica que permite la realización de los planes de producción de corto plazo y así maximizar el potencial productivo de los minerales en el mediano plazo. De este modo, Delphos durante el año 2009 participó en la formulación de un proyecto de investigación llamado “Drilling and Blasting on Demand for Large Open Pits” para integrar las operaciones de perforación y tronadura en la planificación de la producción. A través de este ejercicio hemos podido visualizar como la resolución de planes de producción de manera coherente, integrada y sistémica con el proceso productivo estimulan el desarrollo de la próxima generación de tecnologías mineras.

Durante el año 2009 Conicyt asignó a un grupo de investigadores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile un fondo basal de investigación para el desarrollo de tecnologías aplicadas a la minería. De esta iniciativa nació el Advanced Mining Technology Center (AMTC), cuyo objetivo es integrar conocimiento de las ciencias de la tierra con tecnología de automatización y robótica, planificación y diseño minero para el desarrollo de la próxima generación de tecnologías que la minería debería ocupar y hacer frente a los desafíos de la industria. Delphos es

uno de los Laboratorios que participa activamente en la integración de conocimiento y tecnologías desarrolladas por AMTC en las operaciones mineras. Como resultado de esta relación, el Centro ha apoyado fuertemente el desarrollo del Laboratorio permitiendo la contratación de cuatro investigadores de jornada completa para su trabajo.

Asimismo durante el período 2009, Delphos participó y fue parte de la organización de los congresos APCOM 2009 y MinePlanning 2009, lo que le permitió dar a conocer las investigaciones realizadas al interior de la unidad y también interactuar con otros investigadores y profesionales de la industria.

Delphos posee una amplia red de interacciones en el mundo para la consecución de los objetivos que se ha planteado. Entre éstas cabe destacar su relación con el grupo de investigación de operaciones: Operations Research in Mining (ORM), formado recientemente en marzo de este año, con el que se suscribió un acuerdo para realizar investigación de punta en el desarrollo de algoritmos y modelos que permitirá agilizar la Planificación Minera. Delphos, por su parte, se comprometió a servir como repositorio de bases de datos y aplicaciones desarrolladas para mejorar el estado actual de la Planificación Minera que resulte del trabajo de investigación de ORM. Forman parte de esta Red: Kadri Dagdelen de Colorado School of Mines, Marcus Brazil de Melbourne University, Lou Cacceta de Curtin University, Andrés Weintraub de Universidad de Chile, Alexandra Newman de Colorado School of Mines, Michel Gamache y Marcos Goycoolea de Universidad Adolfo Ibáñez. Confiamos plenamente que la asociación de nuestro Laboratorio con el mundo académico y las problemáticas de la industria minera permitirá agregar dinamismo y por lo tanto, capacidad de análisis a los planes de producción mineros haciéndolos más robustos y de mejor calidad.

Delphos seguirá caminando hacia la creación de CubeMine, aportando al desarrollo de conocimiento a través de Tesis de Magíster y Doctorado, junto a la inserción de herramientas que posibilitará mejorar el estado actual de la disciplina en la industria. También seguirá apoyando la formación de expertos en Planificación Minera para la minería, los que en definitiva tendrán la misión de aplicar los diferentes CubeMines en sus respectivas operaciones, logrando un mejor desempeño económico de la industria en general.

A partir de este año Delphos debe formular asociaciones con la industria para así transformarse en una unidad sustentable y sostenible en el tiempo. Esperamos que el sector minero entienda que iniciativas de este tipo permiten avanzar en la comprensión del potencial real que los recursos y reservas minerales tienen para los accionistas que respaldan nuestros proyectos de desarrollo.

Finalmente, me gustaría agradecer muy especialmente a Diego Hernández, Presidente de BHP Billiton Metales Base, por haber confiado en esta iniciativa de desarrollo al interior de la Universidad de Chile; a Brian Baird por su constante apoyo en la decantación final de los desarrollos al interior de BHP Billiton y su soporte técnico que ha sido de alto valor; a Cleve Lightfoot, quien desde un comienzo aportó con ideas y estrategias para establecer las bases de Delphos y finalmente a Patricio Mora que nos facilitó las pruebas del prototipo de CubeMine en la mina Spence aportando su



conocimiento, tiempo y muy buena voluntad para el desarrollo de los diferentes proyectos con la faena.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Enrique Rubio E.", written in a cursive style.

Enrique Rubio E.  
Director  
DELPHOS – Laboratorio de Planificación Minera  
Universidad de Chile

## Equipo de trabajo



Enrique Rubio E.  
Assistant Professor  
Universidad de Chile



Alexandra Newman  
Associate Professor  
Colorado School of Mines



Sebastián Troncoso B.  
MaSc candidate  
Universidad de Chile



Nelson Morales  
Researcher  
Universidad de Chile



Roussos Dimitrakopoulos  
Professor  
McGill University



Brian Baird  
Global Mine Planning Leader  
BHP Billiton



Eduardo Moreno  
Assistant Professor  
Universidad Adolfo Ibañez



Daniel Espinoza  
Assistant Professor  
Universidad de Chile



Marcos Goycoolea  
Assistant Professor  
Universidad Adolfo Ibañez



Marcelo Vargas  
MaSc candidate  
Universidad de Chile



Juan Pablo Gil R.  
PhD candidate  
Universidad de La Frontera



Fernando Peirano  
MaSc candidate  
Universidad de Chile



Adrialy Muci N.  
MaSc candidate  
Universidad de La Frontera

## Índice

1.	Introducción .....	1
2.	Interacción con otros centros de investigación .....	2
3.	Herramientas de software desarrolladas .....	3
3.1	Algoritmos de Pit Final .....	3
3.2	Algoritmos secuenciadores para rajo de largo plazo .....	3
3.3	Modelos y algoritmos para rajo de corto plazo .....	3
BOS2 .....	3	
BOS2-Uncertainty .....	4	
3.4	Soporte .....	4
4.	Actividades para el año 2010 .....	4
Anexo - Trabajos de Investigación Desarrollados		
	Artículos .....	1
	Presentaciones .....	1

## 1. Introducción

La misión del laboratorio Delphos es ser un referente mundial en el desarrollo, implementación y ensayo de herramientas utilizadas en los procesos de planificación minera.

Los objetivos estratégicos planteados para el laboratorio son:

- Formación de recurso humano altamente calificado: proveer de infraestructura computacional y software para que estudiantes de magíster puedan desarrollar sus investigaciones.
- Desarrollo de modelos ad-hoc a las faenas mineras asociadas al laboratorio, utilizando computadores y software para computación de alto rendimiento, aplicados a problemáticas de planificación minera.
- Investigación aplicada al desarrollo de modelos y algoritmos de planificación minera que faciliten plantearse el problema de planificación minera de manera holística y coherente a la industria en que se inserta.

El Laboratorio de Planificación Minera Delphos cuenta con infraestructura computacional y software suficiente para poder emprender desarrollos en cada una de las etapas del proceso de planificación, desde la planificación estratégica de la mina hasta la programación de la producción del turno. Actualmente los equipos y software que se encuentran en el laboratorio son:

- 5 computadores DELL Precision 390, 2.13GHz, 4GB RAM, disco duro 80GB. Monitor Flat Panel 19" LCD.
- 3 computadores DELL Optiplex 755, 2.13Ghz, 4GB RAM, disco duro 230GB. Monitor Flat Panel 20" LCD.
- 1 cluster de 5 nodos DELL PowerEdge 1950, 1.8GHz Quadcore Xeon Processor, 4GB RAM, 80 GB cada uno. Monitor acoplado a Rack 42u, Flat Panel 15".

En cuanto a software, el laboratorio cuenta con las siguientes licencias de aplicaciones mineras y de optimización:

- 2 licencias Gems 6.2(Gemcom Software).
- 2 licencias Whittle 4.2 (Gemcom Software).
- 2 licencias Mine 2-4D (Datamine).
- 2 licencias NPV Scheduler (Datamine).
- 5 licencias Vulcan Mine Modeller (Maptek).
- 1 licencia Chronos (Maptek).
- 20 licencias Arena 11.0 (Rockwell Software).
- 1 licencia Arena 3D (Rockwell Software)
- Licencias ilimitadas de IBM ILOG CPLEX 12.1 y OPL Studio.

Las actividades docentes relacionadas con el programa de planificación minera y que se relacionan con el laboratorio, son las siguientes:

- Diplomado de Planificación Minera
- Diplomado en Geo Minero Metalurgia

## **2. Interacción con otros centros de investigación**

La actividad del laboratorio ha permitido interactuar con otros centros académicos que complementan las competencias internas encontradas en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, tanto en el ámbito de los proyectos de investigación como en la docencia de post grado. A continuación se resumen las principales actividades que el Laboratorio de Planificación Minera Delphos desarrolla en conjunto con otros centros de investigación y universidades nacionales e internacionales:

- Fondef D06-I1031: Sistemas complejos, computación evolutiva y aplicaciones a la planificación minera.  
Departamento de Ingeniería y Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez.  
Centro de Modelamiento Matemático, Universidad de Chile.  
Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de La Frontera.
- Diplomado en planificación minera. Módulo de riesgo y simulación de operaciones Unitarias.  
Cosmo McGill University – Roussos Dimitrakopoulos.
- General Integer Programming Modeling.  
Colorado School of Mines – Alexandra Newman.  
Naval Postgraduate School – Kevin Wood.
- Heurísticas numéricas y desarrollos ad-hoc.  
Universidad de La Frontera – Juan Pablo Gil, Adrialy Muci.
- Centro de Investigación de Operaciones para la industria minera.  
Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile – Rafael Epstein.  
Instituto Milenio Sistemas Complejos de Ingeniería – Andrés Weintraub.
- Advanced Mining Technology Center  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile – Javier Ruiz del Solar.

### **3. Herramientas de software desarrolladas**

Parte importante de la actividad en Delphos es la prueba de software existente, pero también el desarrollo de nuevas herramientas que incorporen las últimas tecnologías en algoritmos y matemáticas, con el fin de testearlas y validarlas en aplicaciones con las empresas mineras. En este sentido, el laboratorio dispone de los siguientes desarrollos propios:

#### **3.1 Algoritmos de Pit Final**

Delphos dispone de dos implementaciones de algoritmos para cálculo de Pit Final: una implementación del algoritmo de Lerchs y Grossmann, programada en **C** y disponible tanto en el cluster como en forma de ejecutable para Windows, al cual se han introducido mejoras importantes en su ejecución al elegir más inteligentemente el árbol de partida; y una implementación de la modelación como problema de Flujo Máximo/Corte Mínimo, en Java, y que utiliza la licencia CPLEX disponible en el laboratorio para calcular el pit final.

#### **3.2 Algoritmos secuenciadores para rajo de largo plazo**

Además de las herramientas de cálculo de pit final, se han desarrollado múltiples herramientas para la construcción de pits anidados.

- Generación de Pits Anidados mediante Revenue Factors y basada en la implementación propia del algoritmo de Lerchs & Grossman disponible en el laboratorio.
- Secuenciamiento bloque a bloque mediante algoritmos Greedy y Gershon.
- Generación de pits anidados mediante Floating Bands, basada en el algoritmo de Lerchs y Grossman implementado.

#### **3.3 Modelos y algoritmos para rajo de corto plazo**

##### **BOS2**

Se ha utilizado un enfoque basado en programación entera para desarrollar un algoritmo secuenciador de bloques que construye una guía a la confección de los polígonos de explotación de corto plazo, considerando capacidades de transporte y planta, precedencias, pero también de blending de material enviado a la planta, stocks y geometrías factibles de operativizar.

Este modelo, implementado en AMPL y utilizando CPLEX para su resolución, que ha sido denominado “Blending Optimization Sequencing and Scheduling” (BOS2), fue probado con éxito en la mina Spence para confeccionar planes de corto plazo (3 meses), transfiriéndose a la misma una primera versión.

A la primera versión (transferida), se han realizado sucesivas mejoras que permiten abordar el problema a nivel anual, con mejores geometrías, y que se resuelven en una fracción del tiempo.

## **BOS2-Uncertainty**

BOS2 ha sido adaptado también para incorporar la incertidumbre geológica de los modelos de bloques, desarrollándose así un primer prototipo de modelo y herramienta que permite construir polígonos pero considerando múltiples modelos de bloques obtenidos mediante simulaciones condicionales.

### **3.4 Soporte**

Adicionalmente a las herramientas algorítmicas mencionadas, el laboratorio ha desarrollado programas utilitarios que permiten la manipulación eficiente de los grandes volúmenes de información correspondiente a modelos de bloque de rajo, así como el cálculo eficiente sobre los mismos. Entre estas herramientas se cuentan:

- Valorizador de modelos de bloque, en base a archivos paramétricos de precios y costos.
- Cálculo de precedencias paralelo, para distintas

Complementariamente se ha desarrollado una potente librería en Python que permite la implementación rápida de algoritmos simples, la manipulación de la información, y la visualización de resultados para volúmenes de datos pequeños, lo cual permite probar múltiples ideas y automatizarlas rápidamente, acelerando el proceso de construcción de prototipos.

## **4. Actividades para el año 2010**

A continuación se detallan las principales actividades a realizarse en el año 2010:

- Finalización de la programación del algoritmo Lerchs & Grossmann en paralelo.
- Aplicación del modelo de optimización de corto plazo en Spence y en Escondida y transferencia de las herramientas a las faenas.
- Aplicación del modelo de transición en faenas interesadas.
- Publicación de investigación 2010 en revistas y congresos internacionales: MININ, MinePlanning.
- Proyecto FONDEF de preparación minera subterránea.
- Postulación e incorporación en los proyectos del Instituto Francés para la Investigación y Automatización (INRIA).
- Búsqueda de patrocinadores para sustentabilidad del laboratorio en periodo 2011 – 2015.

# Anexo – Trabajos de Investigación

---

## Artículos

A continuación se presenta el listado de artículos desarrollados al interior de Delphos y en colaboración con las distintas instituciones asociadas. Estos artículos incluyen presentaciones en conferencias, seminarios, y revistas (algunos de los cuales se encuentran en proceso de revisión).

	<b>Título</b>	<b>Autor(es)</b>
1	A Review of Operations Research in Mine Planning	Newman A., Rubio E., Caro R., Weintraub A.
2	Scheduling an open-pit mine for extraction	Chicoisne R., Espinoza D., Goycoolea M., Moreno E., Rubio E.
3	Deciding When to Go Underground: Mine Scheduling Above and Below Ground	Newman A., Yano C., Rubio E.
4	Optimal Open Pit Short Term Planning under Blending Constraints	Vargas M., Morales N., Rubio E., Mora P
5	Modelo de Secuenciamiento de Extracción de Reservas Incorporando Variables Operacionales y Geometalúrgicas para Mediano y Corto Plazo	Vargas M.
6	Short Term Planning Under Strong Blending Constraints in BHP Billiton Spence Mine	Mora P., Morales N., Rubio E., Vargas M.
7	Robust Open Pit Planning Under Geological Uncertainty	Morales N., Rubio E.
8	Riesgo Asociado a Incorporación de Recursos Indicados e Inferidos	Peirano F., Morales N., Rubio E.
9	Planning Caving Operations Using Underground Infrastructure Reliability Models, Andina Case Study	Rubio E., Pais G., Aguayo A., Montes J.
10	Definición de Pit Final y Programa de Producción Bajo Incertidumbre	Peirano F.

## Presentaciones

Se incluye además la presentación del laboratorio hecha para la Operations Research for Mining Network, creada este año y de la cual el laboratorio es parte:

11	Delphos: Mine Planning Laboratory	Rubio E.
----	-----------------------------------	----------





**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Ingeniería de Minas

Patrocinado por



**bhpbilliton**