



DETERMINACIÓN DE RESERVAS Y MACROSECUENCIA DE EXPLOTACIÓN BAJO INCERTIDUMBRE

JUAN IGNACIO GUZMÁN

SEMINARIO "ESTIMACION Y VALORIZACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES"
26 DE JUNIO 2019



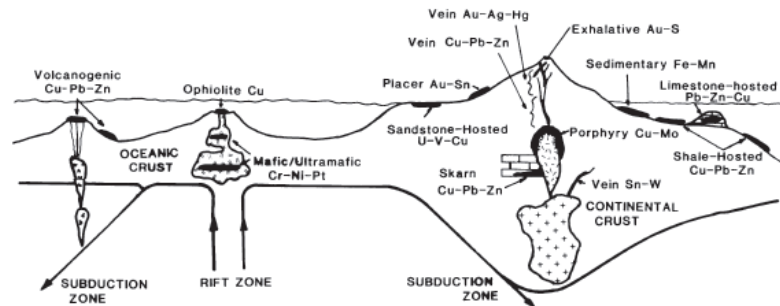
TABLA DE CONTENIDOS

1. MOTIVACIÓN
2. INCERTIDUMBRES RELEVANTES
3. ALGORITMO DE PSEUDOFLUJO ESTOCÁSTICO
4. IMPLEMENTACIÓN EN DEEPMINE
5. MACROSECUENCIA BAJO INCERTIDUMBRE
6. CONCLUSIONES

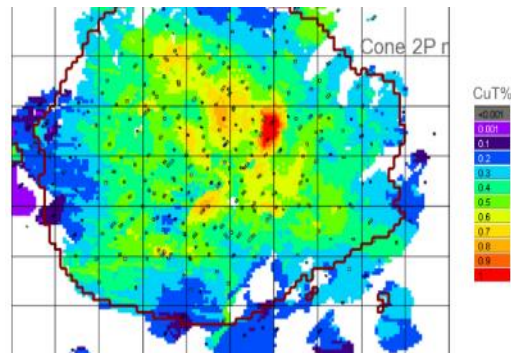
1. MOTIVACIÓN

PROBLEMA DE LA EXPLOTACIÓN ÓPTIMA DE MINAS

Distribución de minerales en la tierra



Heterogeneidad espacial de leyes en un depósito



Planificación minera



Mina



Planta



Marketing



Observación

Para tener una operación minera eficiente y obtener el máximo beneficio del depósito mineral a explotar es necesario **planificar**

La planificación nos permite saber qué esperar de un depósito particular en términos de beneficio económico, tonelaje de metal o elementos valiosos producidos, cantidad de material que es necesario desplazar, tamaño de la operación, tiempo de funcionamiento, inversiones necesarias, costos, etc.

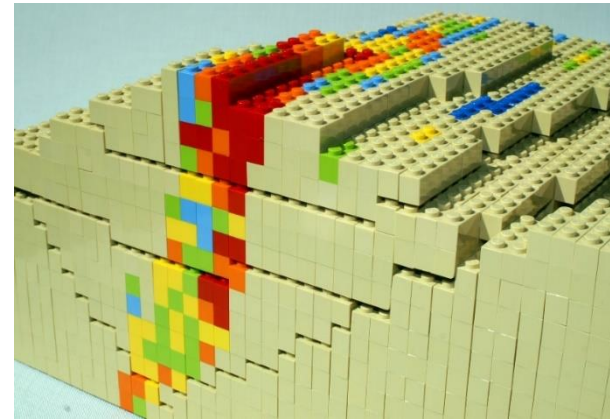
En particular la planificación minera permite determinar las **reservas y macrosecuencia de explotación**

1. MOTIVACIÓN

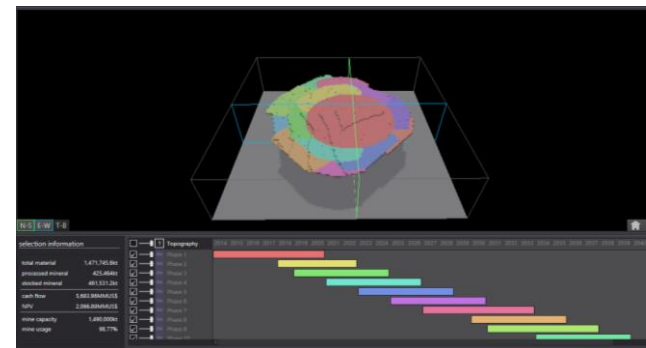
DEFINIENDO EL PROBLEMA DE LA MINA

- El problema es equivalente al de **maximizar el VAN de la operación**, en base a un conjunto de **variables de control** sujeto a un conjunto de **restricciones**
- El **VAN** se define como la suma de los flujos de caja descontados (considerando inversiones, ingresos y egresos, así como impuestos)
- En el caso con incertidumbre se reemplaza el VAN por el VAN esperado y/o algún otro indicador de riesgo
- El **estado** de la operación se relaciona con la evolución de las **variables de control** a través de una o varias **ecuaciones de estado**
- Este es un problema de optimización infinito-dimensional en tiempo y espacio continuo (¿por qué?), aunque la mayoría de las veces se resuelve solo en tiempo y espacio discreto

Discretización del problema en la práctica



Reservas y macrosecuencia de explotación



Observación

El espacio se discretiza con un **Modelo de Bloques** (regular o irregular), donde cada bloque tiene propiedades definidas (tipo de roca, ley de cada commodity, densidad, etc.)

El material a extraer corresponde a un subconjunto de estos bloques. De estos, el material a procesar (mineral) es a la vez un subconjunto del material a extraer y define las **reservas**

La secuencia temporal en la que se debe extraer el material es lo que se conoce como la **macrosecuencia de explotación**

1. MOTIVACIÓN

¿CÓMO SE RESUELVE EN LA PRÁCTICA ESTE PROBLEMA?

- Tradicionalmente, la industria ha resuelto el problema de forma **secuencial** (estrategia del tipo “dividir para conquistar”) sobre una base particular para cada operación, asumiendo **certidumbre** en todas las variables del problema
- El problema se divide en problemas más sencillos y abordables, para luego unir las soluciones individuales y llegar así a una solución general suficientemente buena

Las reservas y macrosecuencia se derivan típicamente resolviendo el problema de forma secuencial bajo condiciones de certidumbre

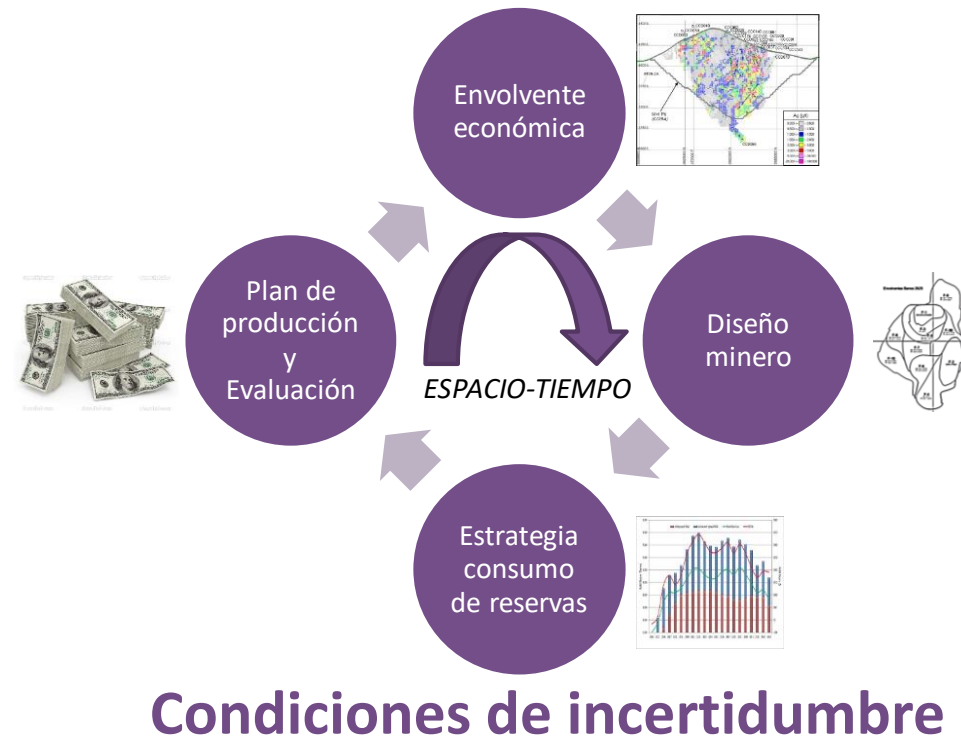


1. MOTIVACIÓN

¿CÓMO SE DEBERÍA RESOLVER ESTE PROBLEMA?

- El problema es de hecho uno “**espacio-temporal**”, que no puede ser resuelto separando sus componentes espacial y temporal como hasta la fecha se ha hecho (y aún hoy es la forma estándar de producir planes mineros en la práctica)
- De forma equivalente el problema en general contiene un sinnúmero de variables inciertas, tales como precios de commodities, costos, y variables geometalúrgicas, entre otras

Las reservas y macrosecuencia se debiesen derivar resolviendo el problema de forma simultáneo con incertidumbre

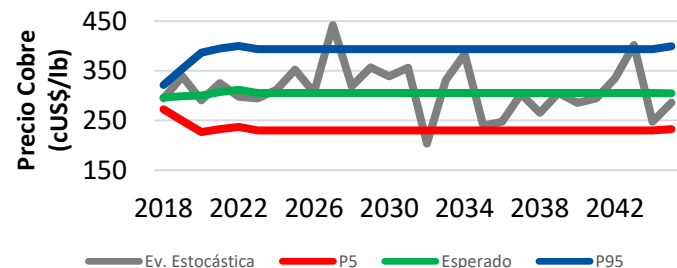


2. INCERTIDUMBRES RELEVANTES

INCERTIDUMBRES EN EL PROBLEMA DE LA MINA

Incertidumbres externas

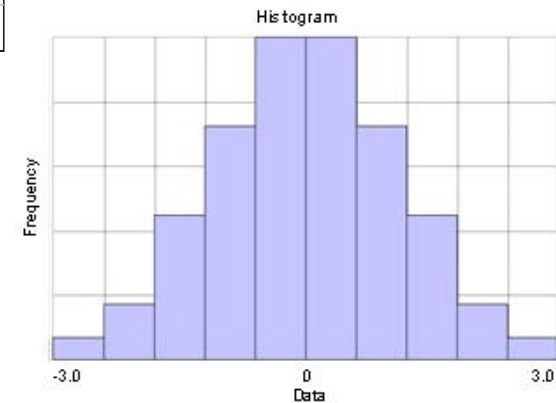
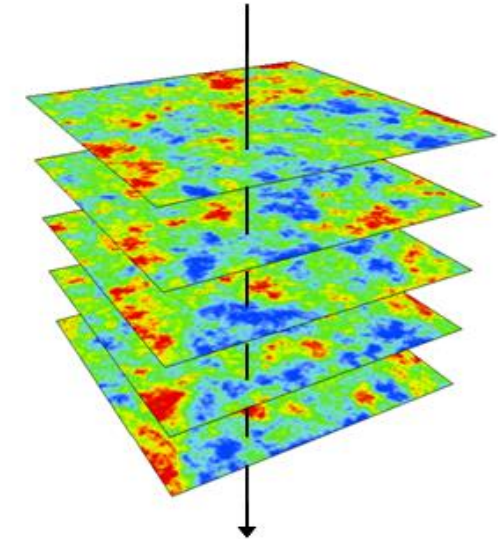
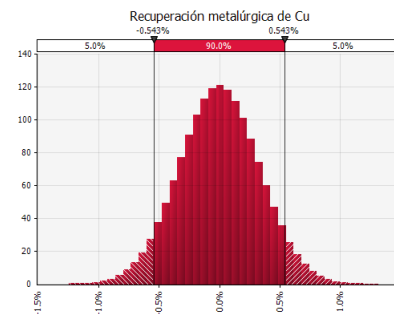
Tipo	Incertidumbres más comunes
Mercado	Precio del <i>commodity</i> principal, precio de subproductos, tasa de cambio, precios de energía y otros insumos críticos, costos de mano de obra, monto de la inversión, tasa de descuento
Financiera	Tasa de interés, disponibilidad de recursos financieros
Política	Expropiación de recursos, estabilidad gubernamental
Legislación	Cambio en tasa de impuesto y/o <i>royalties</i> , cambio en leyes laborales
Sociales	Demandas de la comunidad, estabilidad social
Ambientales	Cambio en la regulación (material particulado, gaseoso y otros), permisos ambientales
Comerciales	Cambio en especificaciones de compra
Industriales	Guerra de precios, producción del resto de productores, confiabilidad de los proveedores, entrada de nuevos productores, poder de mercado de los clientes, sustitución.
Tecnológicas	Mejoramiento de la tecnología actual, capacidad de tratamiento de nuevo mineral



Fuente: Guzmán, J.I. 2019. Fundamentos de Economía Minera. Reverté, Barcelona

Incertidumbres internas

Tipo	Incertidumbres más comunes
Geológica	Distribución de leyes, tonelaje de reservas, continuidad de las unidades geológicas, variabilidad del índice de Bond
Geotécnica	Colapso de roca, estallido de roca, falla en paredes de la mina
Metalúrgica	Recuperación (%), tiempo de procesamiento (cinemática) calidad del producto
Operacionales	Disponibilidad de equipos, disponibilidad de recursos humanos, falla en infraestructuras, variabilidad de la mezcla a planta, disponibilidad de insumos, ambiental, dilución, productividad de equipos, condiciones climáticas
Proyectos	Atraso de proyectos, <i>Ramp-up</i> , Capacidad de extracción, Capacidad de procesamiento
Organizaciones	Huelgas, productividad laboral



LERCHS-GROSSMAN VERSUS PSEUDOFUJO

Lerchs-Grossman

- Lerchs y Grossman (LG) publicaron en 1965 un algoritmo basado en **teoría de grafos** para determinar el límite final del *pit*, con el cual se definen las reservas
- Cada bloque se considera un nodo en el grafo, y las conexiones entre ellos son las relaciones de precedencia establecidas por los ángulos máximos de talud (restricciones geométricas)
- LG es óptimo y su complejidad computacional es relativamente razonable (para el tamaño actual de los modelos)

Pseudoflujo

- Hochbaum publicó en 2008 un algoritmo que permite optimizar el tiempo de resolución de Lerchs-Grossman
- En la actualidad algunos software ya utilizan este algoritmo, con la única ganancia evidente dada por el tiempo de resolución, lo que en modelos de bloques de minas reales puede ser bastante significativo

Observación

Ambos algoritmos se encuentran desarrollados asumiendo condiciones de certidumbre, de tal forma que tanto el valor de todos los nodos en el grafo como las conexiones entre los nodos son conocidos *a priori*

GEM desarrolló como parte de una investigación interna para su software DeepMine el algoritmo de pseudoflujo estocástico, para el caso en que esta afecta el valor de los bloques (nodos), lo que permite incorporar una gran cantidad de incertidumbres

No se ha desarrollado aún el caso en que las conexiones entre los nodos (asociado a incertidumbre en el modelo geotécnico)

REVENUE FACTOR VERSUS RISK FACTOR PARA LA GENERACIÓN DE PITS ANIDADOS

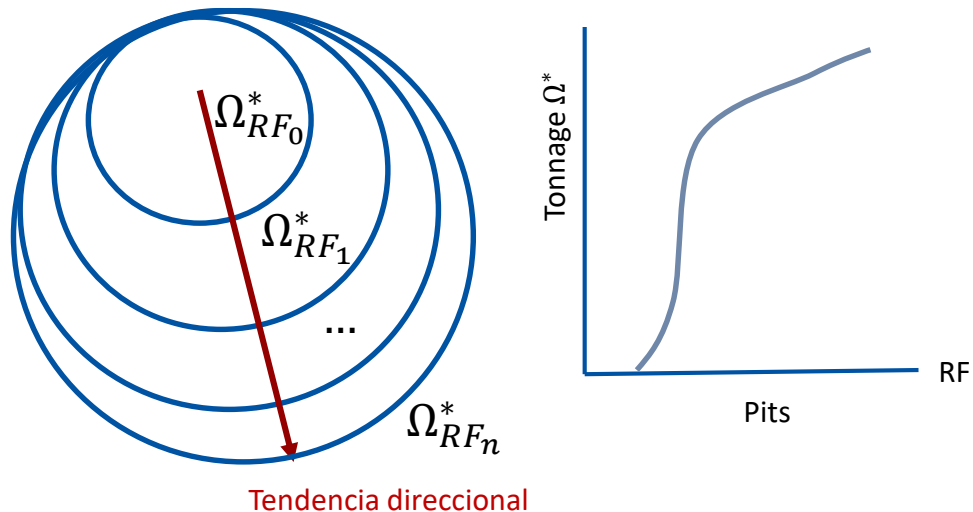
Revenue Factor

$$\max_{\Omega} \sum_{i \in \Omega} \pi_i$$

$$RF_0 < RF_1 < \dots < RF_n$$

$$\Omega_{RF_0}^* \subset \Omega_{RF_1}^* \subset \dots \subset \Omega_{RF_n}^*$$

Riesgos implícitos tratados:
Precio de *commodities*



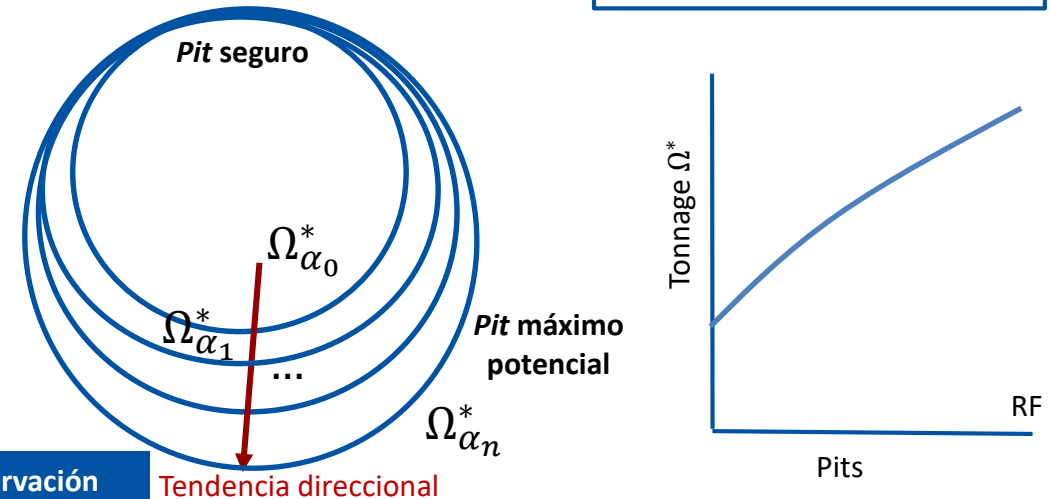
Risk Factor

$$\max_{\Omega} P_{\alpha} \left[\sum_{i \in \Omega} \pi_i \right]$$

$$\alpha_0 = 0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_n = 100\%$$

$$\Omega_{\alpha_0}^* \supset \Omega_{\alpha_1}^* \supset \dots \supset \Omega_{\alpha_n}^*$$

Riesgos explícitos a tratar:
Precio de *commodities*
Ley de *commodities*
Rec. metalúrgicas
Densidad
OPEX



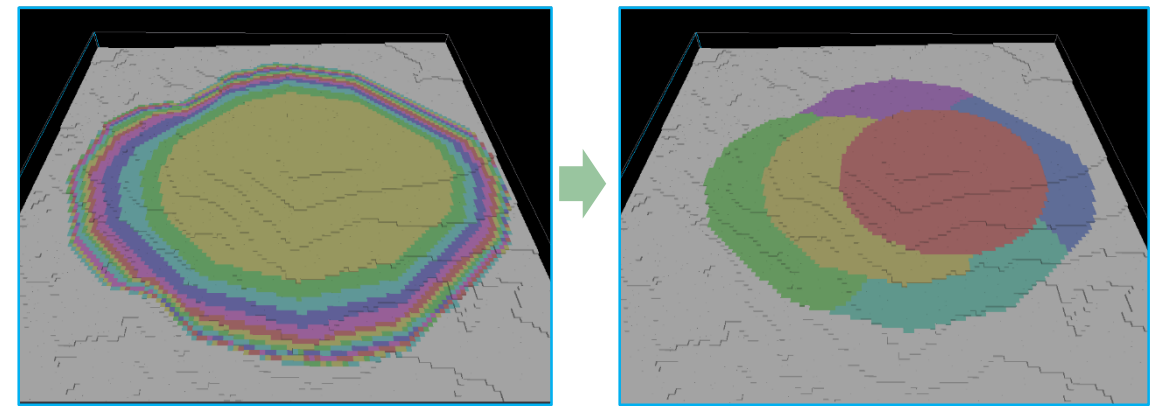
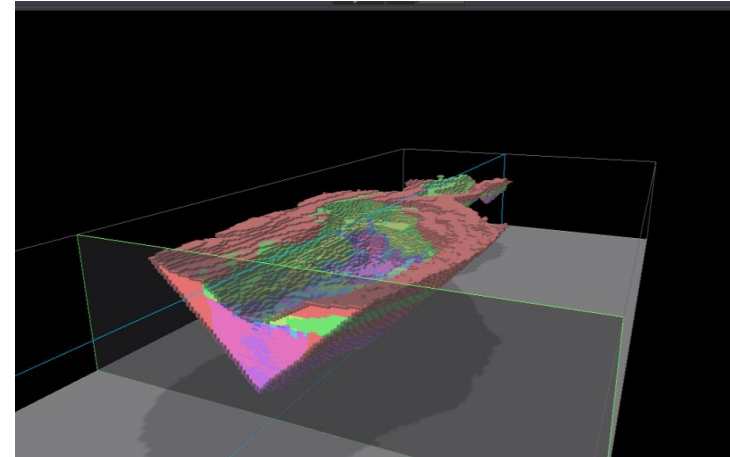
Observación

Tendencia direccional

- Mejora la continuidad de pits anidados (se reduce el "GAP problem")
- Reservas dependen del perfil de riesgo de la empresa (posibilidad de crear portfolios para varias minas)

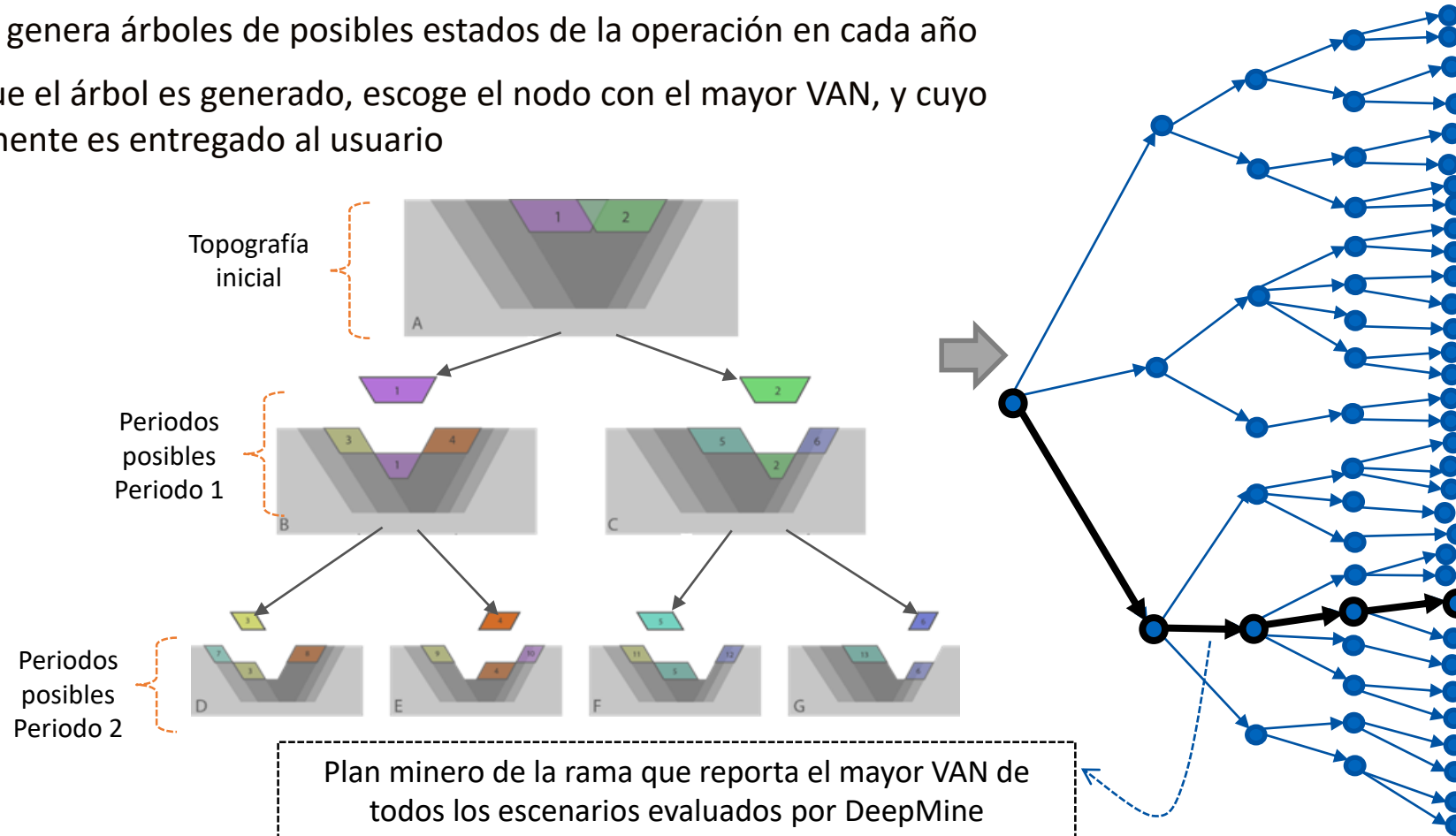
SOFTWARE DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA MINAS A CIELO ABIERTO

- DeepMine es un *software* de planificación estratégica para minas a rajo abierto que trabaja a nivel de bloques
- Basado en programación dinámica aproximada, el innovador algoritmo “Deep” desarrollado en DeepMine genera una secuencia anual de extracción, sin la necesidad de depender en la definición previa de fases. Al contrario, esta herramienta permite guiar la planificación minera por medio de la generación de pseudofases
- La figura de la derecha muestra cómo a partir de la definición de pits anidados (los que pueden actuar como guía o no), DeepMine determina una secuencia óptima desde el punto de vista económico, guiando al planificador en las posteriores etapas de planificación



SOFTWARE DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA MINAS A CIELO ABIERTO (CONT.)

- DeepMine genera árboles de posibles estados de la operación en cada año
- Una vez que el árbol es generado, escoge el nodo con el mayor VAN, y cuyo plan finalmente es entregado al usuario



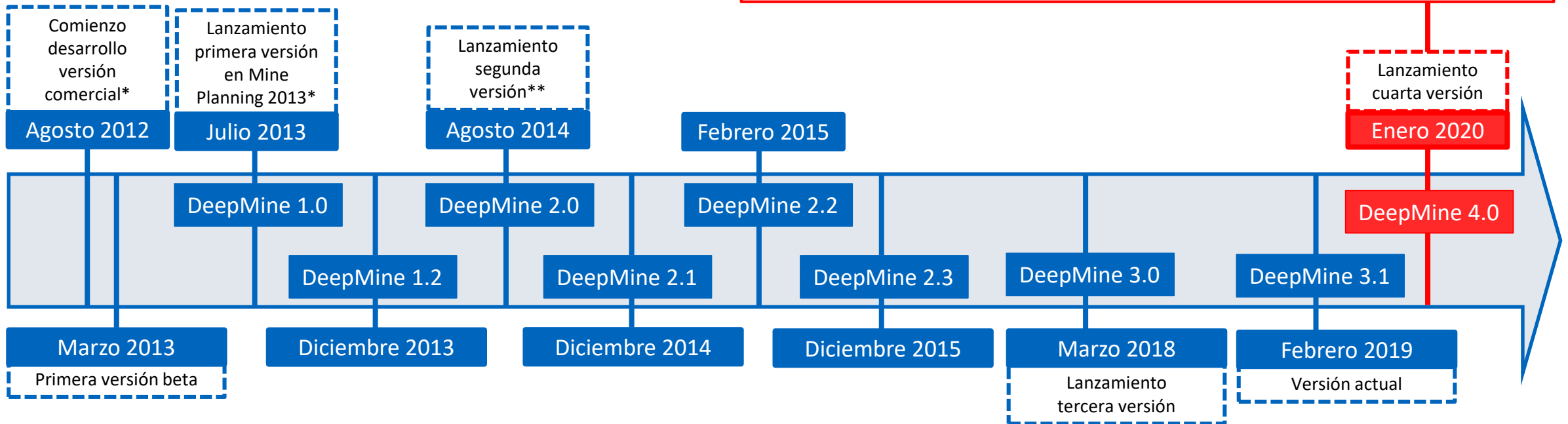
4. IMPLEMENTACIÓN EN DEEPMINE

DEEPMINE ESTÁ CONSTANTEMENTE EVOLUCIONANDO

- 2008-2010: Período de investigación
- 2011: Desarrollo de prototipo
- 2012-2013: Desarrollo comercial

Nuevas funcionalidades

- **Menor tiempo en la generación de pits anidados**
- **Inclusión de Risk Factor en la generación de pits anidados**
- Inclusión de riesgos técnico-económicos en la generación de planes mineros
- Mejoras de diseño en la generación de fases automáticas



*Desarrollo realizado con el apoyo de Programa de Proveedores de Clase Mundial (Codelco)

**Desarrollo realizado con el apoyo de CORFO

4. IMPLEMENTACIÓN EN DEEPMINE

TESTEO DE ALTERNATIVAS EN MODELOS ORIGINALMENTE CONSIDERADOS INDICA QUE LA SOLUCIÓN OBTENIDA ES SUFICIENTEMENTE ROBUSTA

1 Implementación de algoritmo *Risk Factor* en generación de pits
Se implementó la posibilidad de generar pits anidados en base a una simulación considerando los principales riesgos de una operación minera

2 Riesgos incorporados en prueba DeepMine

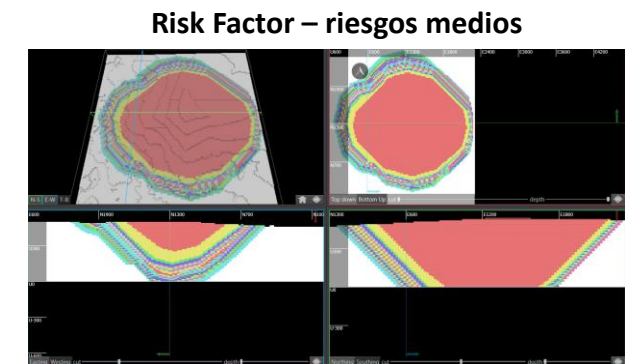
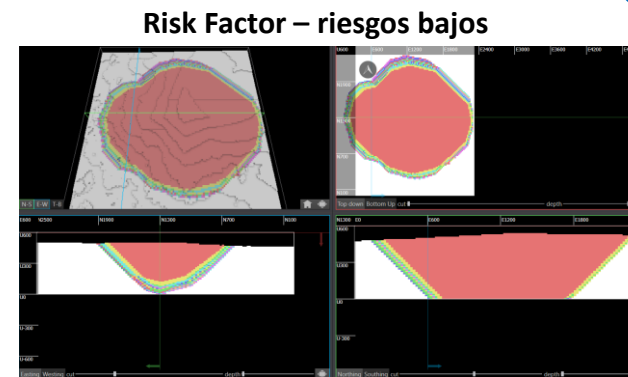
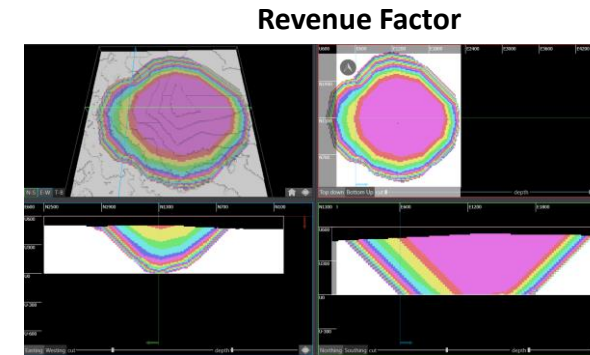
- Precio del cobre
- Ley del *commodity* principal
- Recuperación metalúrgica
- Costo mina
- Costo planta
- Costo transporte
- Densidad

3 Modelos utilizados para la prueba

- M1 (870.000 bloques)
- M2 (4.398.720 bloques)
- M3 (2.949.180 bloques)
- M4 (4.868.864 bloques)

4 Múltiples pruebas variando parámetros de entrada

- Se realizaron variaciones en parámetros de entrada como número de iteraciones y nivel de riesgo de variables de entrada



4. IMPLEMENTACIÓN EN DEEPMINE

EL ALGORITMO *RISK FACTOR* NO GENERA UN AUMENTO SIGNIFICATIVO EN LOS TIEMPOS DE GENERACIÓN DE PITS ANIDADOS EN DEEPMINE

Prueba	Descripción	Tiempo M1	Tiempo M2	Tiempo M3	Tiempo M4
1	Caso determinístico	3:37	00:53:28	2:14:41	1:02:40
2	Simulación de 100 iteraciones con $\sigma_{Precio Cu}$ y distribuciones densidad, Rec. y OPEX	3:16	00:53:38	2:01:13	0:56:00
3	Simulación de 100 iteraciones con $2 \cdot \sigma_{Precio Cu}$ y distribuciones densidad, Rec. y OPEX	4:24	1:47:05	2:00:57	1:46:04
4	Simulación de 1.000 iteraciones con $2 \cdot \sigma_{Precio Cu}$ y distribuciones densidad, Rec. y OPEX	6:23	00:39:37	2:15:43	2:07:57
5	Simulación de 1.000 iteraciones con $2 \cdot \sigma_{Precio Cu}$, distribución en densidad y mayor desviación en distribuciones Rec. y OPEX	3:34	1:46:23	1:52:55	1:51:48

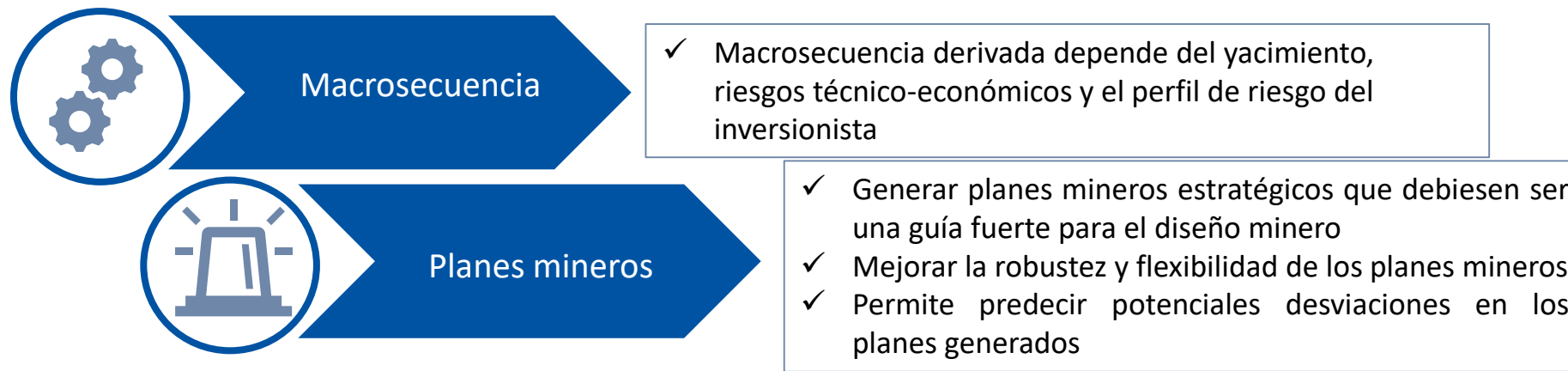
Observación

- Se observa que incluso para modelos grandes (M2, M3 y M4) la implementación del algoritmo de *Risk Factor* no significa un aumento considerable en el tiempo de ejecución de pits anidados
- Por lo demás, el hecho de aumentar el número de iteraciones en la simulación tampoco tiene un efecto significativo en el tiempo de procesamiento

5. MACROSECUENCIA BAJO INCERTIDUMBRE

EL EQUIPO DE DEEPMINE SE ENCUENTRA EN LA ACTUALIDAD GENERANDO LAS BASES CONCEPTUALES PARA LA DERIVACIÓN DE LA MACROSECUENCIA Y GENERACIÓN DE PLANES CON INCERTIDUMBRE

- Hoy en día la versión 3.1 de DeepMine permite derivar macrosecuencias de explotación considerando el riesgo del precio de los *commodities*, permitiendo generar opciones reales con respecto a los destinos de los bloques e inversiones de ajuste en capacidad
- Se está trabajando en la actualidad en incorporar el resto de incertidumbres que ya están incorporadas en la generación e *pits* anidados con objeto de derivar macrosecuencias robustas y *ad hoc* al perfil de riesgo de la compañía minera



LA ESTIMACIÓN DE LAS RESERVAS Y MACROSECUENCIA DE EXPLOTACIÓN BAJO INCETIDUMBRE SERÁ PRONTO UNA REALIDAD

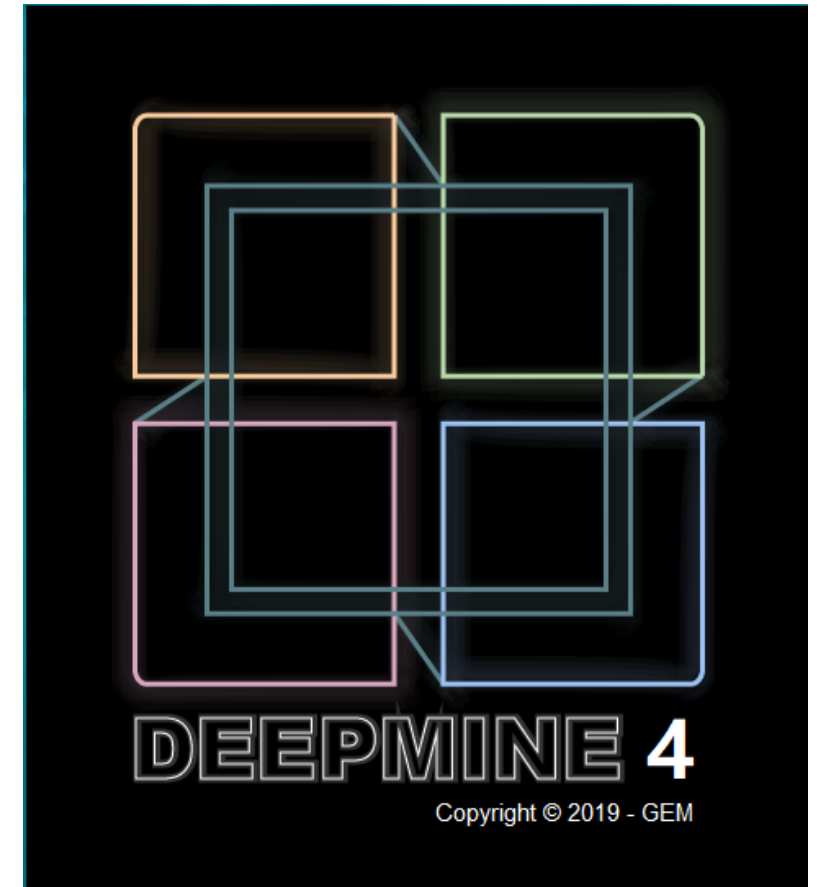
- El uso de *risk factor* constituye un **cambio de paradigma** frente al uso tradicional del *revenue factor*
 - Con esta nueva metodología será posible derivar los *pits* con un cierto nivel de confianza y su probabilidad de ocurrencia, lo que tiene fuertes implicancias para efectos de **declaración de reservas**
 - Se observa que la implementación de *Risk Factor* permite resolver el “GAP problem”, a excepción del primer *pit*, pues permite suavizar la incorporación de *pits* incrementales en el proceso, haciendo más robusta la solución del *pit* óptimo
 - El número de iteraciones en la simulación no debiese generar aumentos significativos en los tiempos de solución, lo cual representa un elemento fundamental para aplicar esta solución en la práctica
- La inclusión de riesgos en etapas tempranas de la planificación permitiría generar **diseños de mina más robustos, aumentar la confiabilidad de los planes y maximizar el valor seguro para los accionistas**
- Además, la metodología del *Risk Factor* permitiría reducir el riesgo del portfolio de proyectos y minas en operación de una compañía minera

JUAN IGNACIO GUZMÁN

Gerente General

jiguzman@gem-ing.cl

¡Muchas gracias!



VERSIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
0	26/06/2019	Versión original	JIG	FG	JIG

ACABO DE PUBLICAR UN LIBRO DONDE SE EXPONEN LOS FUNDAMENTOS ECONÓMICO-MATEMÁTICOS DE LA EXPLOTACIÓN DE MINAS DEL PROBLEMA ESPACIO-TEMPORAL BAJO INCERTIDUMBRE

- ¡El libro tiene más de 700 páginas!
- En cuanto a la complejidad de las matemáticas requeridas por el libro, desafortunadamente el problema es extremadamente complejo y por tanto es esperable que las matemáticas requeridas no sean triviales. Por lo mismo, toda aquella matemática que escapa de los contenidos mínimos de un programa tradicional de ingeniería o economía se expone en detalle en el libro, asumiendo que el lector no posee conocimiento previo (ocupando un poco más del 30% del libro)
- Sin embargo, los primeros tres capítulos (alrededor del 10% del libro) exploran la problemática aquí expuesta en mayor detalle y están pensados precisamente en aquellos lectores que no desean introducirse en la complejidad matemática del problema y su solución

