

PLANIFICACIÓN MINERA ESTRATÉGICA CON DEEPMINE

JUAN IGNACIO GUZMÁN
GERENTE GENERAL, GEM



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA
3. ESTADO DEL ARTE
4. PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA MODERNA
5. DEEPMINE
6. CASO DE ESTUDIO
7. APLICACIÓN ACTUAL

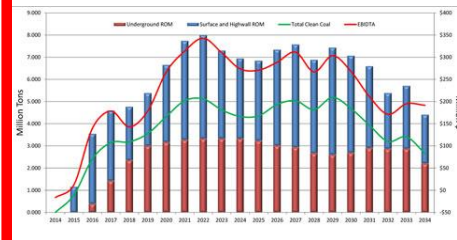
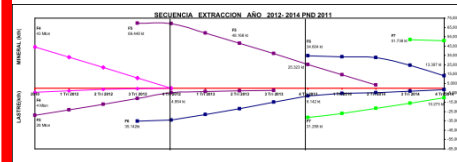
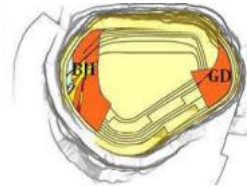
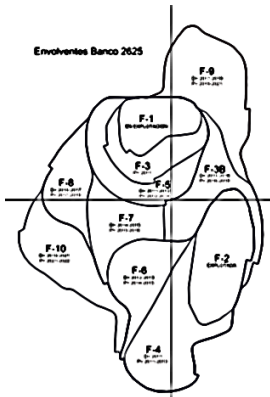
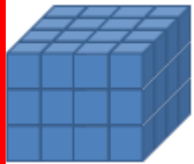
1. INTRODUCCIÓN

HORIZONTES DE PLANIFICACIÓN

Estratégica

Táctica

Operacional



ID	Task Name	Predecessors	Duration	Jul 23 '06	Jul 30 '06	Aug 6 '06
1	Start		0 days	S	M	T
2	a	1	4 days	T	W	T
3	b	1	5.33 days	T	W	T
4	c	2	5.17 days	W	T	F
5	d	2	6.33 days	W	T	F
6	e	3,4	5.17 days	T	W	T
7	f	5	4.5 days	T	W	T
8	g	6	5.17 days	W	T	F
9	Finish	7,8	0 days	F	S	S

1. INTRODUCCIÓN

DECISIONES ESTRATÉGICAS

- La discusión siguiente se enfoca en minería de rajo abierto
- Tamaño de la operación
 - Tonelaje de material a remover y mineral a tratar (*pit* final)
 - Años de funcionamiento de la operación (LOM)
 - Magnitud del movimiento anual (capacidad de mina)
- Plantas de procesamiento
 - Procesos de tratamiento a instalar
 - Tonelaje a procesar (capacidad de plantas)
 - Producción anual
- (Macro-) Secuencia de explotación

Nota: Antes de resolver el problema debemos ser capaces de formularlo (modelarlo) correctamente

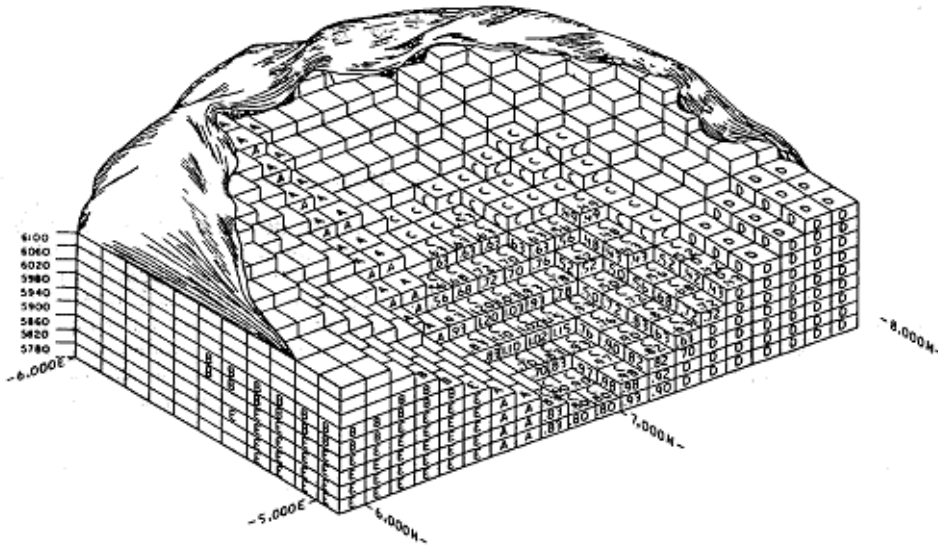
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

DEFINIENDO EL PROBLEMA MINERO

- 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**

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

DISCRETIZACIÓN DEL PROBLEMA

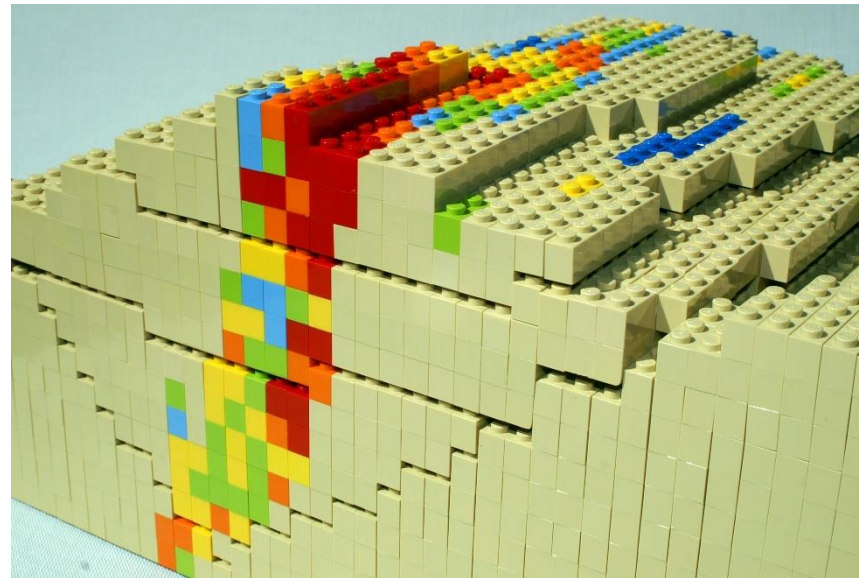


- El espacio se discretiza con un **Modelo de Bloques** (regular o irregular), donde cada bloque tiene propiedades definidas (tipo de roca, ley de cada *commodity*, densidad, etc.)
- El conjunto del modelo debe describir adecuadamente la propiedad minera

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

DISCRETIZACIÓN DEL PROBLEMA (CONT.)

- 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
- El tiempo se discretiza dependiendo del horizonte del plan (años, meses, semanas, días)

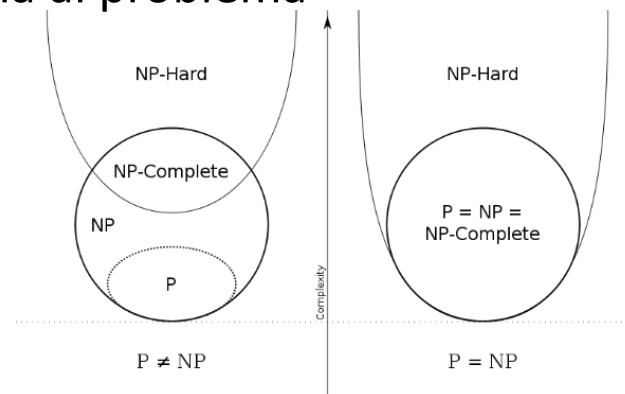


Representación con Legos de un Modelo de Bloques

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA MATEMÁTICO DISCRETO

- El problema de optimización discreto asociado al modelo pertenece a la clase de problemas de optimización combinatorial del tipo **NP-Hard**
 - No existe una solución conocida en tiempo polinomial, o equivalentemente es más fácil encontrar una solución que verificar que sea óptima al problema



En la práctica, para problemas de la “vida real”, **no se puede alcanzar el óptimo matemático** en un tiempo razonable

3. ESTADO DEL ARTE

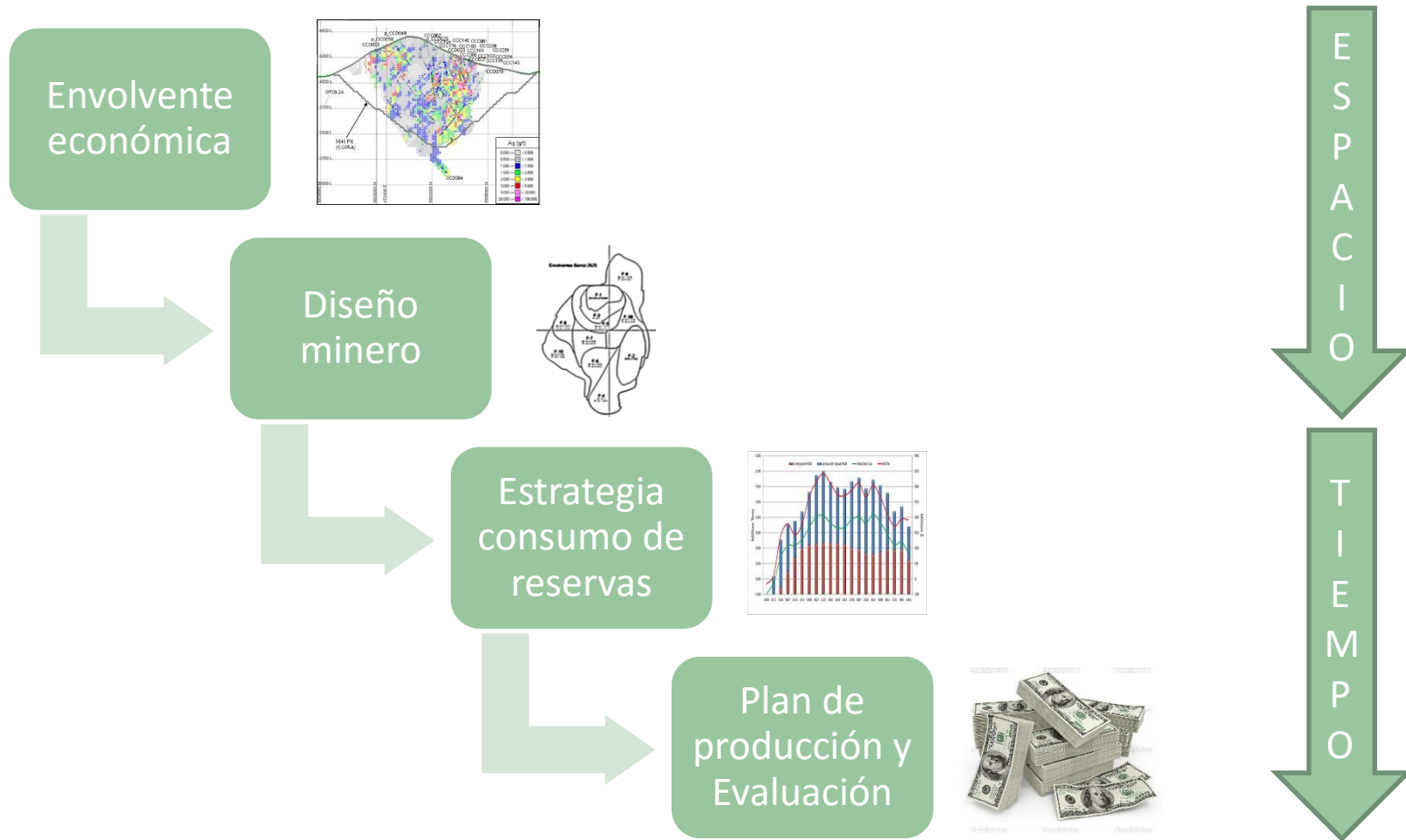
¿CÓMO SE RESUELVE EN LA PRÁCTICA ESTE PROBLEMA?

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



3. ESTADO DEL ARTE

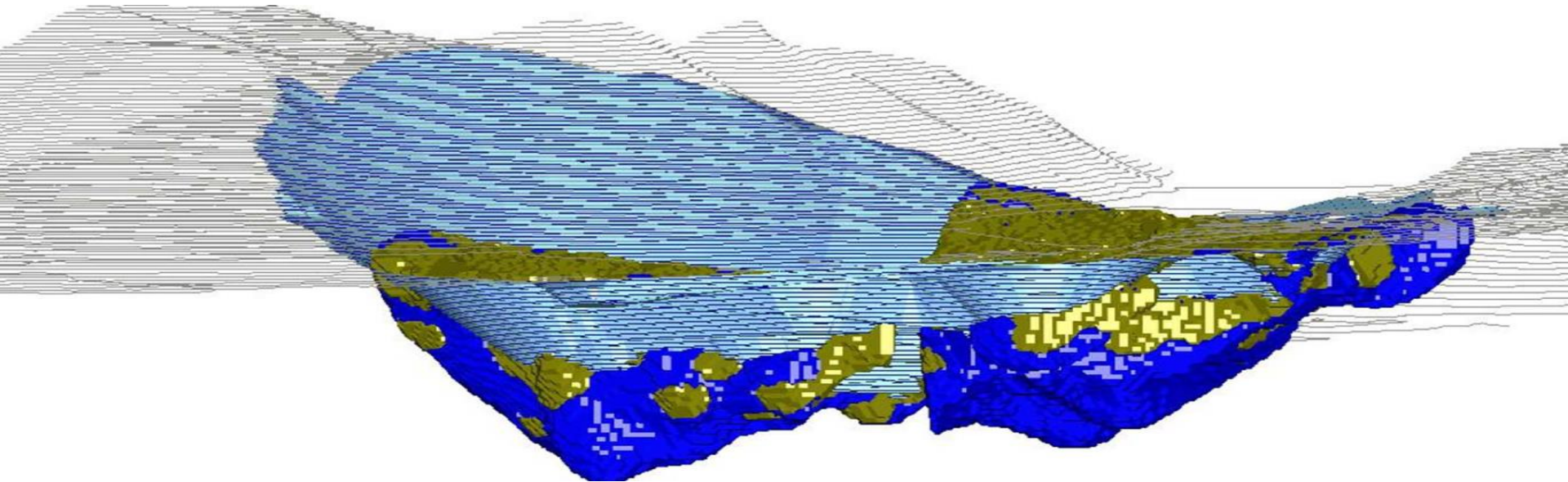
PLANIFICACIÓN MINERA SECUENCIAL



3. ESTADO DEL ARTE

ALGUNAS FORMULACIONES MATEMÁTICAS AL PROBLEMA DISCRETO ESPACIAL

- Valoración estática de los bloques y evaluación mediante:
 - Métodos “manuales”
 - Cono flotante
 - Algoritmo de Lerchs-Grossman



3. ESTADO DEL ARTE

ALGUNAS FORMULACIONES MATEMÁTICAS AL PROBLEMA DISCRETO TEMPORAL

The image displays several mathematical formulas related to probability distributions and calculus. The most prominent formula is the derivative of the log-likelihood function for a normal distribution with respect to the mean parameter a :

$$\frac{\partial}{\partial a} \ln f_{a, \sigma^2}(\xi_1) = \frac{(\xi_1 - a)}{\sigma^2} f_{a, \sigma^2}(\xi_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left\{-\frac{(a - \xi_1)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

Other visible formulas include the Fisher information matrix M defined as the negative expected value of the second derivative of the log-likelihood function:

$$M = -E\left[\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln L(\xi, \theta)\right]$$

and the Fisher information matrix M defined as the expected value of the squared score function:

$$M = E\left[\left(\frac{\partial}{\partial \theta} \ln L(x, \theta)\right)^2\right]$$

- Programación Lineal (LP)
- Programación Entera (IP)
- Programación Entera Mixta (MIP)
- Programación Dinámica

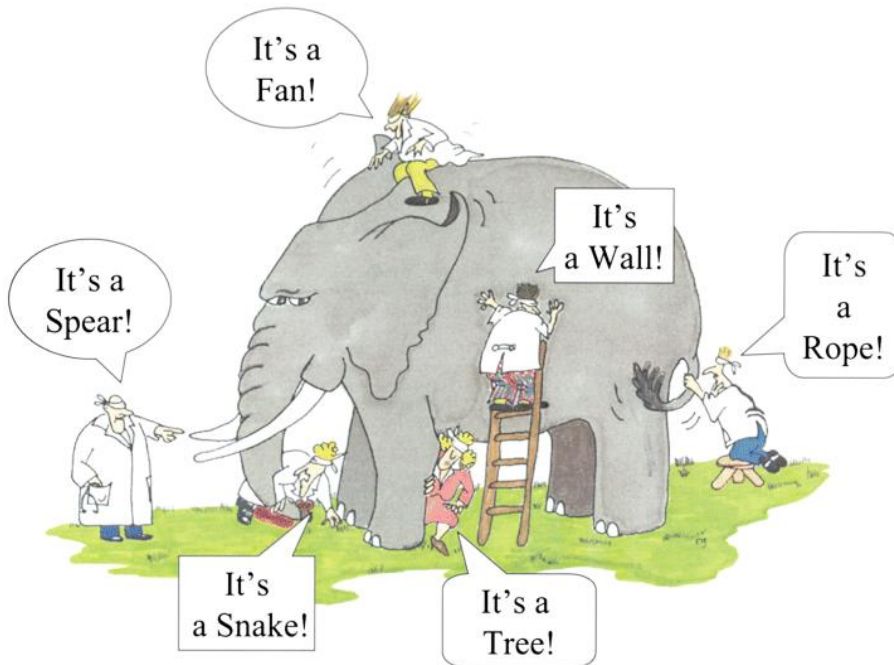
4. PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA MODERNA

EL PROBLEMA INTEGRAL ES ESPACIO-TEMPORAL



4. PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA MODERNA

LA IMPORTANCIA DE RESOLVER EL PROBLEMA INTEGRADO



- Al buscar soluciones parciales a subproblemas corremos el riesgo de no ser capaces de identificar al “animal” correctamente
- En estimaciones propias la industria minera podría estar reduciendo, producto de las actuales soluciones, 10% o más el VAN de sus negocios

4. PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA MODERNA

REQUISITOS DE UNA SOLUCIÓN INTEGRAL

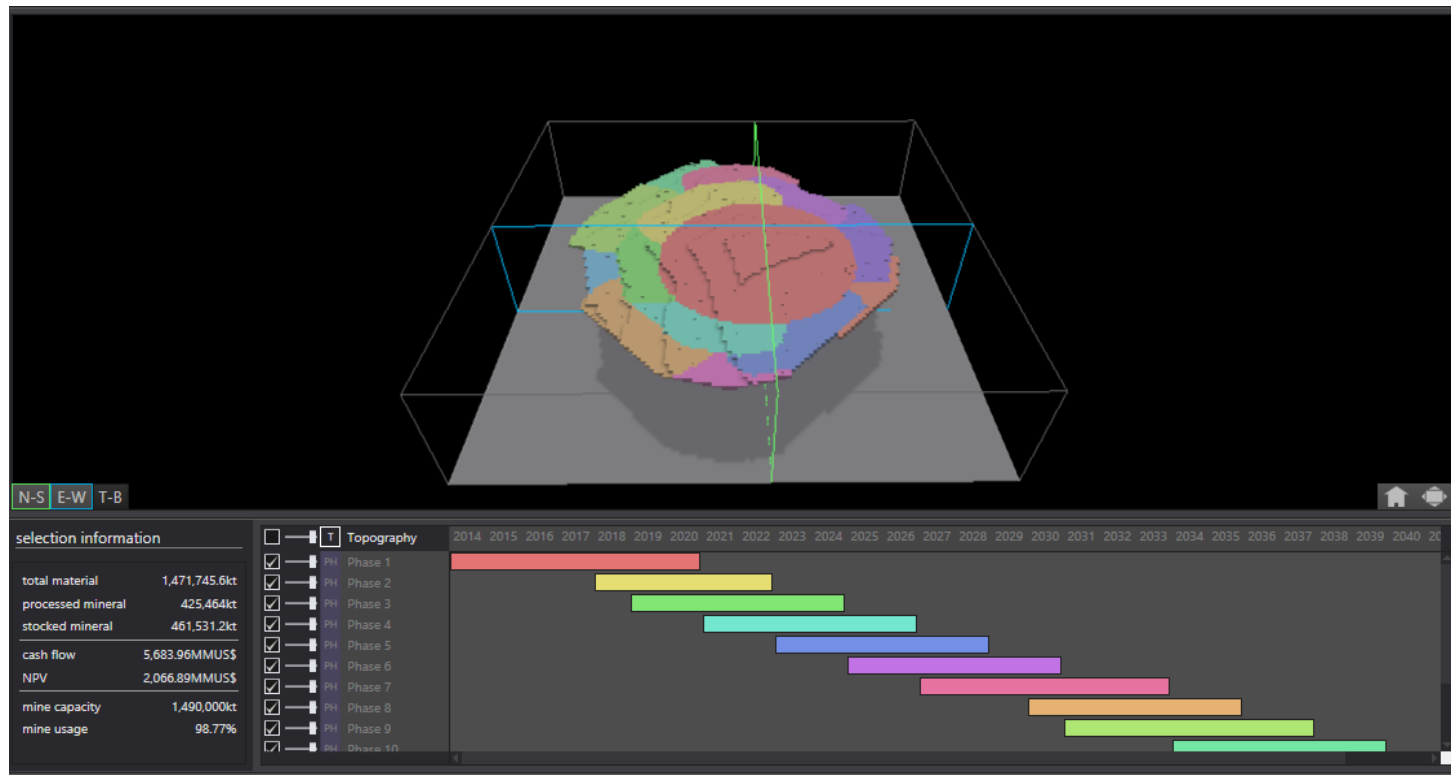
- Operar a nivel de bloques
- Considerar todos los *inputs* y restricciones relevantes del problema
- Generar a partir del modelo de bloques una secuencia de explotación operativizable



5. DEEPMINE

DEEPMINE: PLANES MINEROS ESTRATÉGICOS SIN LÍMITES

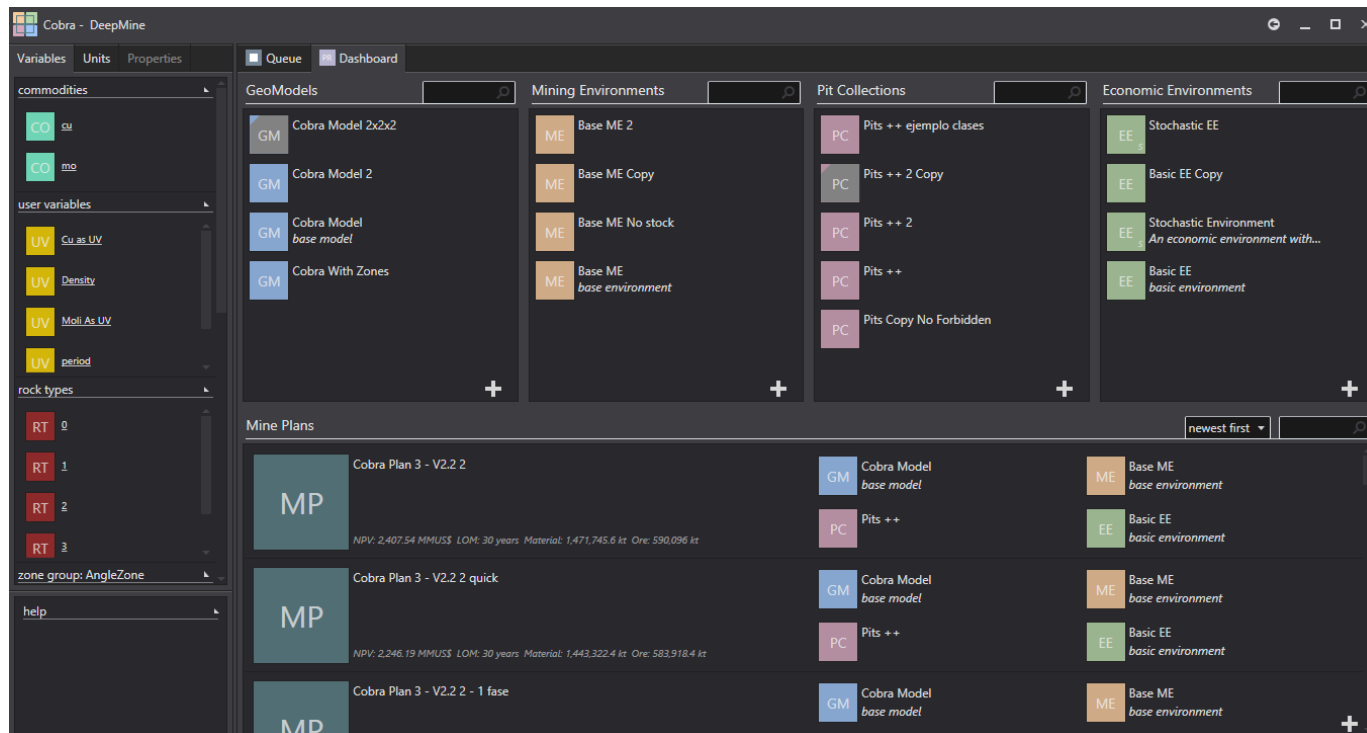
- DeepMine es un *software* de planificación estratégica cuyo motor de cálculo permite extraer el máximo valor de cada depósito, directamente desde el modelo de bloques



5. DEEPMINE

INTERFAZ MODERNA PENSADA EN MAXIMIZAR USABILIDAD

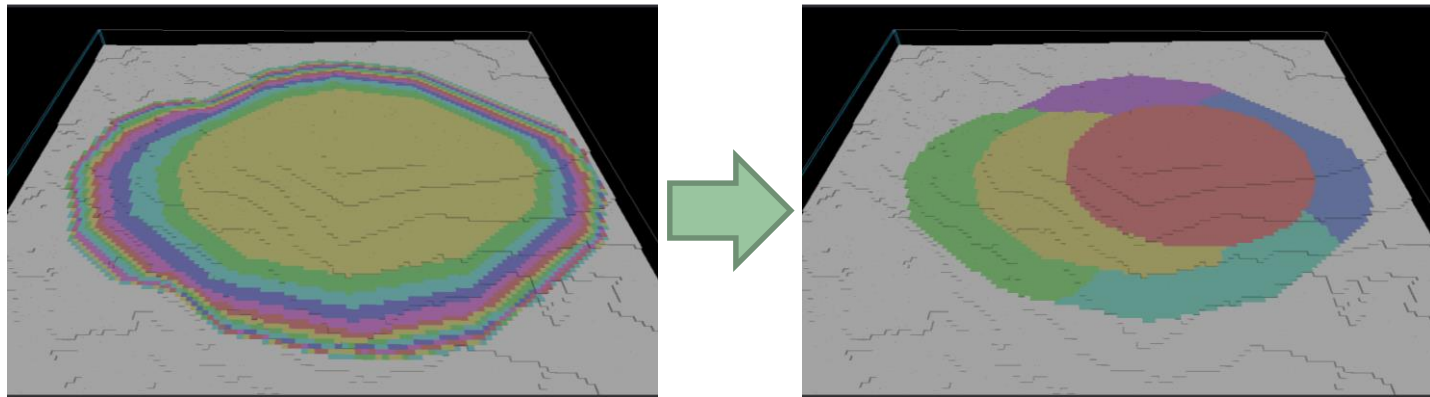
- Está diseñado para ser simple e intuitivo, y permite modelar las principales complejidades de una mina a cielo abierto a nivel estratégico, acomodando, por ejemplo, múltiples procesos y recursos



5. DEEPMINE

DEEPMINE RESUELVE EL PROBLEMA ESPACIO-TEMPORAL

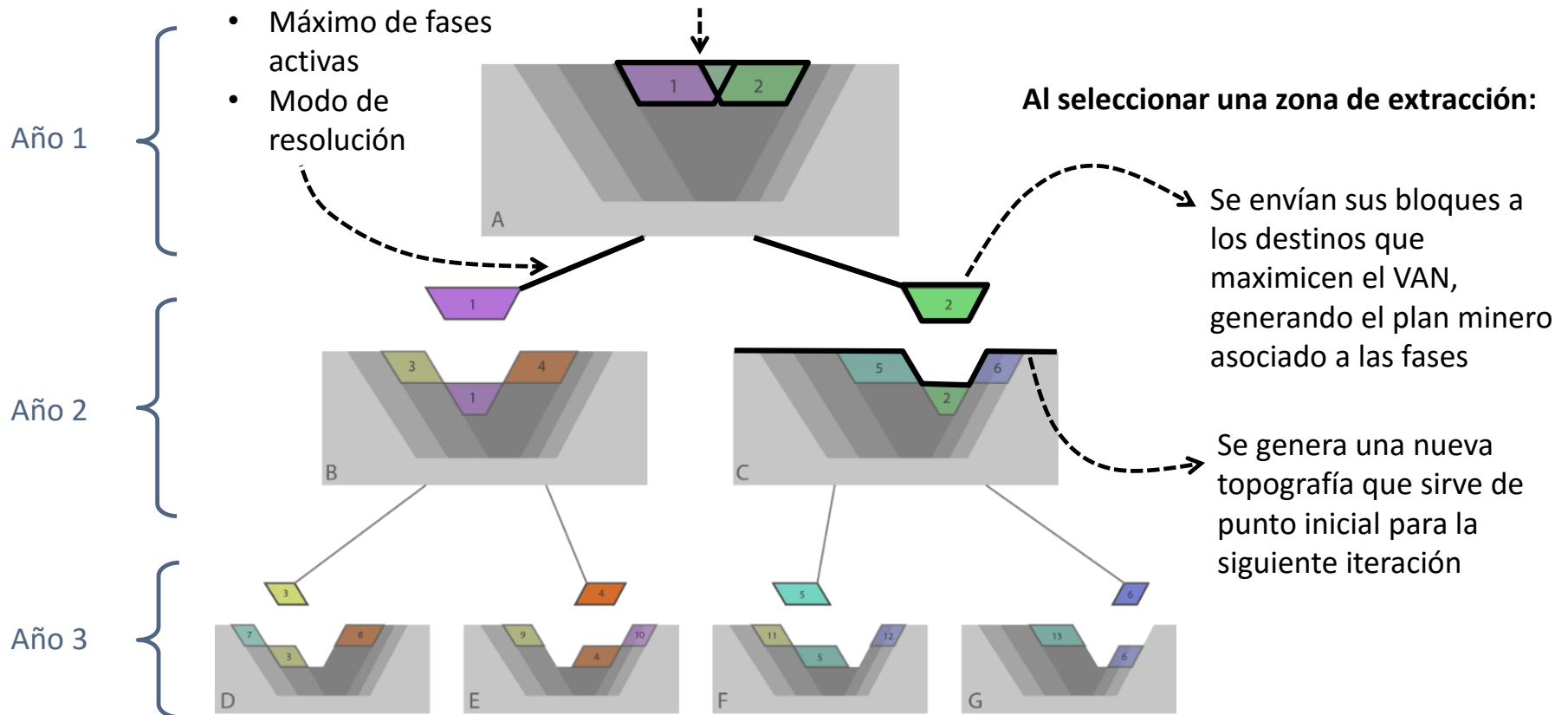
- Basado en programación dinámica, el motor de DeepMine genera un programa anual de extracción, sin la necesidad de contar con fases previamente diseñadas. DeepMine, en cambio, provee como resultado una guía para el diseño



Ejemplo de generación automática de fases en DeepMine. La imagen a la izquierda muestra la secuencia de *pits* anidados en colores. En este caso, como ocurre frecuentemente, no es fácil determinar cómo derivar fases a partir del conjunto de *pits*. A la derecha, el conjunto de fases generadas por DeepMine

5. DEEPMINE

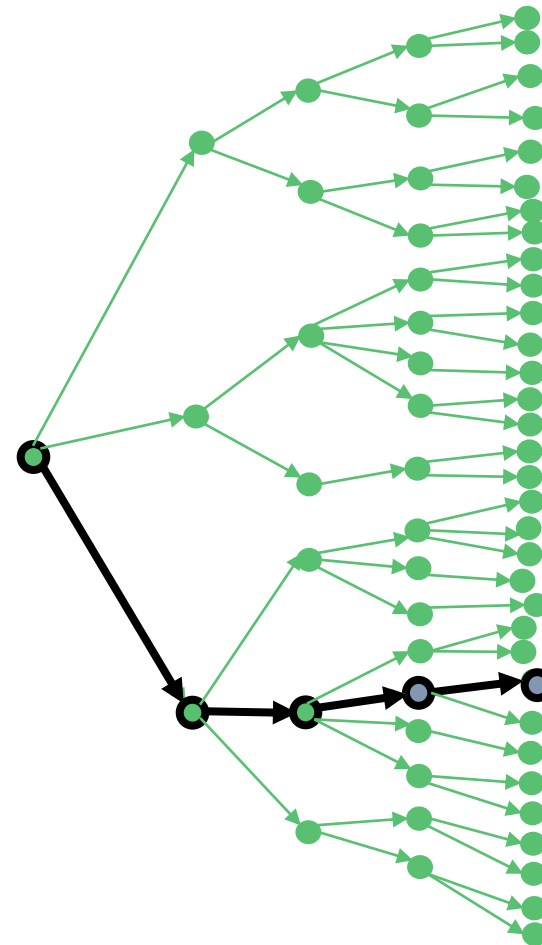
ESQUEMA DE SOLUCIÓN EN DEEPMINE



5. DEEPMINE

ESQUEMA DE SOLUCIÓN EN DEEPMINE (CONT.)

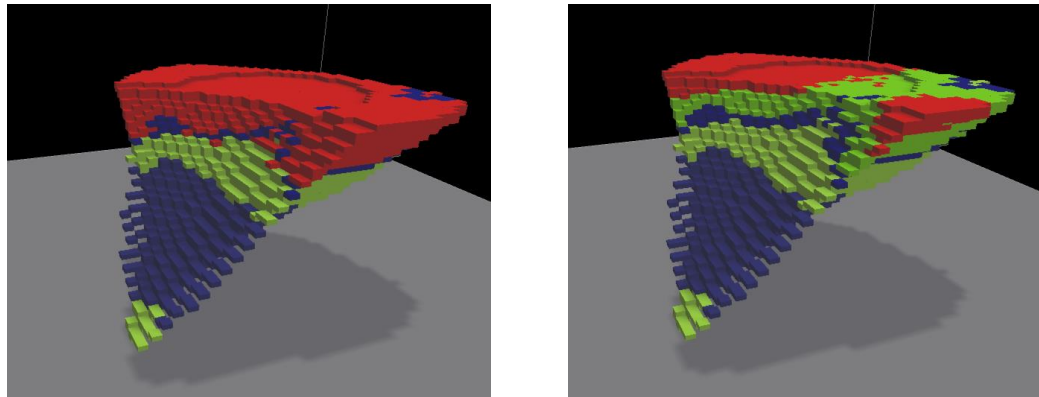
- DeepMine construye un árbol con miles o millones de alternativas
 - El primer nodo corresponde a la topografía inicial
 - En cada periodo se exploran alternativas de desarrollo
- Cada nodo representa un estado posible de la mina
 - Una vez construido el árbol se selecciona la ruta de mayor VAN



5. DEEPMINE

DEEPMINE PERMITE TRABAJAR LA INCERTIDUMBRE DE LOS PRECIOS DE *COMMODITIES*

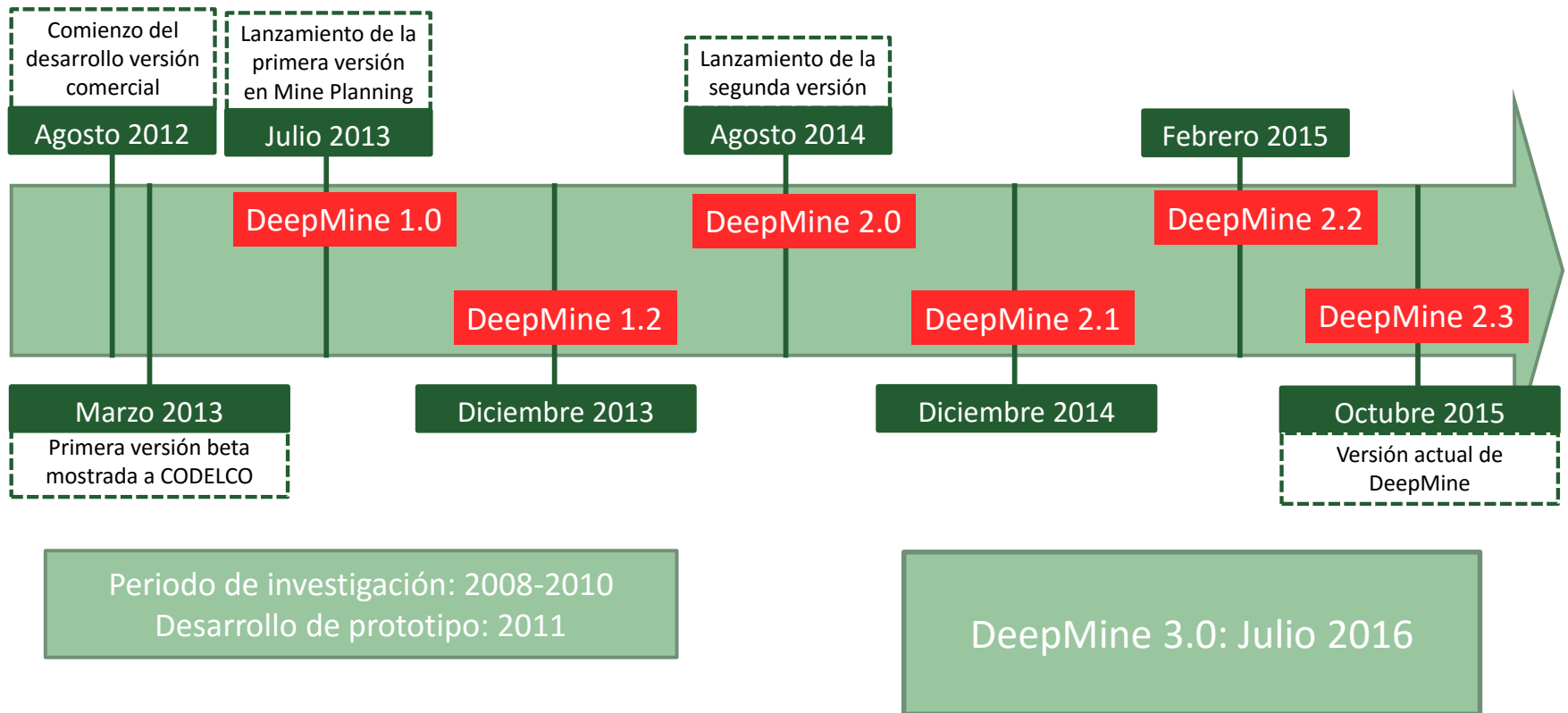
- Es el único *software* disponible actualmente que puede generar un plan minero bajo incertidumbre de precios de *commodity* minerales. Se deriva una secuencia única, con variaciones en los destinos de los bloques según los precios observados. Con la capacidad además de generar planes flexibles utilizando Opciones Reales



Se muestran los destinos de los bloques en colores: los rojos van a botaderos, los verdes a stock y los azules son procesados. En la imagen se puede comparar el caso de mínimo VAN (izquierda) con el de máximo VAN (derecha) para un proyecto del norte de nuestro país.

5. DEEPMINE

DEEPMINE 2.3: LA EVOLUCIÓN DE DEEPMINE



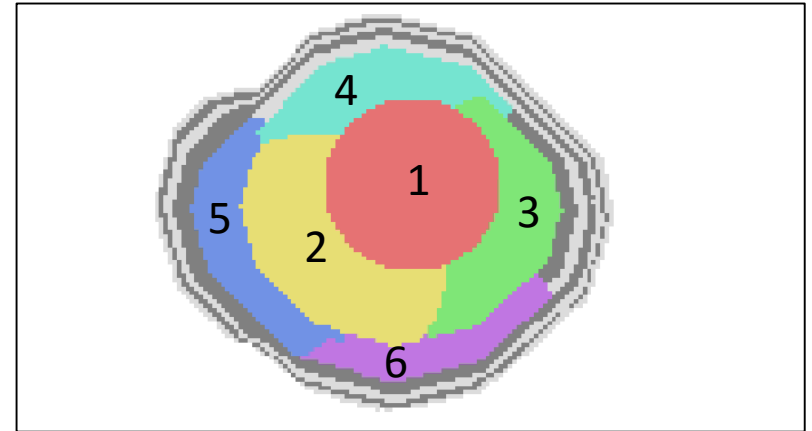
CASO DE ESTUDIO

- Mina ficticia Cobra: Cobre y Molibdeno
- Caso base:
 - Diámetro fase inicial: 800 metros
 - Ancho mínimo de fase: 150 metros
 - Largo máximo de fase: 1.200 metros
- Casos a comparar:
 - Variación 1: Diámetro fase inicial: 1.200 metros
 - Variación 2: Largo máximo de fase: 2.000 metros

6. CASO DE ESTUDIO

RESULTADOS CASO BASE

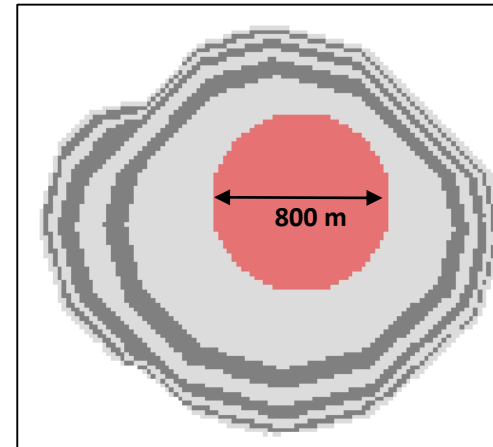
- VAN total:
 - 2.207,4 MMUS\$
- VAN primera fase:
 - 74,4 MMUS\$
- LOM:
 - 30 años
- Material total
 - 1.488.260,8 Kton



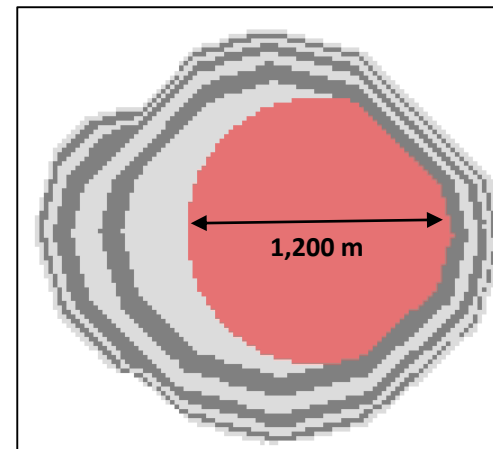
6. CASO DE ESTUDIO

RESULTADOS VARIACIÓN 1: DIÁMETRO INICIAL 1.200 METROS

- VAN total:
 - 2.029,3 MMUS\$
- VAN primera fase:
 - 659,5 MMUS\$
- LOM:
 - 30 años
- Material total
 - 1.489.883,2 Kton



Fase 1
Caso Base

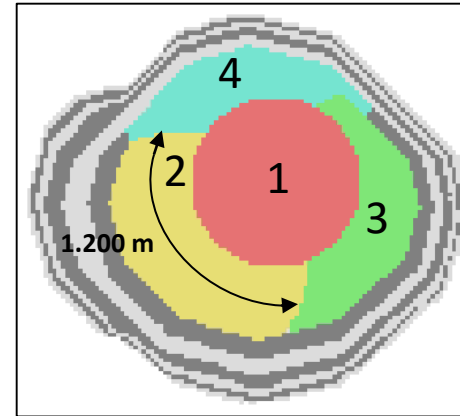


Fase 1
Variación 1

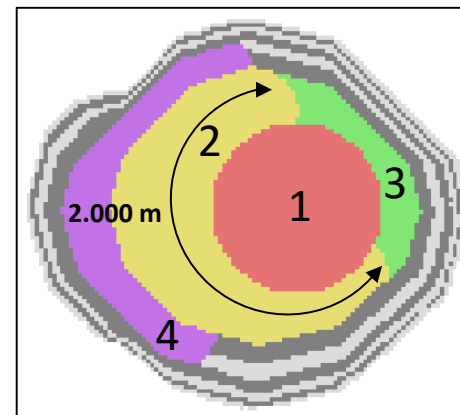
6. CASO DE ESTUDIO

RESULTADOS VARIACIÓN 2: LARGO MÁXIMO 2.000 METROS

- VAN total:
 - 2.080,6 MMUS\$
- LOM:
 - 30 años
- Material total
 - 1.476.488 Kton



Caso Base:
Fases 1,2,3,4



Variación 2:
Fases 1,2,3,4

PLANIFICACIÓN MINERA ESTRATÉGICA CON DEEPMINE

- Luego de haber sido lanzado hace un poco más de 2 años, DeepMine ha sido exitosamente aplicado en más de 30 minas y proyectos con objeto de identificar el máximo valor a extraer en un depósito, así como la forma de capturar dicho valor
- Además de la venta de licencias, DeepMine ha sido incorporado desde 2014 al servicio de Análisis de Riesgos y Opciones de GEM. A la fecha algunas de las principales minas de Chile y el mundo han contratado nuestros servicios con objeto de identificar la ruta estratégica de mayor valor para el desarrollo de su operación
- Adicionalmente al aspecto comercial, en 2015 se firmaron convenios de uso para cursos e investigación, tanto con la Universidad de Chile como la Universidad Católica

JUAN IGNACIO GUZMÁN

Gerente General

jiguzman@gem-ing.cl

CARLOS HINRICHSEN

Gerente de Desarrollo de Negocios

chinrichsen@gem-ing.cl

Este servicio ha sido entregado bajo los controles establecidos por un Sistema de Gestión de la Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001. Número de Certificado: 8309

VERSIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
0	04-11-2015	Versión original	JIG	CH	JIG