

# Optimización y Simulación como Herramientas de Planificación Bajo Incertidumbre

Preparado por: Gonzalo Nelis S.



**fcfm**

Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

# Agenda

- Introducción
- Tipos de Incertidumbre
- Optimización y Simulación
- Técnicas de Optimización
  - Minimización de Desviaciones
  - Planificación Aversa al Riesgo
  - Programación Estocástica
- Simulaciones
  - Aplicaciones
  - Dsim
- Conclusiones



# Introducción



# Incertidumbres

## Geológica

- Ley de mineral
- Contenido de contaminantes
- Tipo de roca/mineralurgia

## Operacional

- Rendimientos de equipos
  - Fallas/Eventos
  - Interferencias

## Mercado

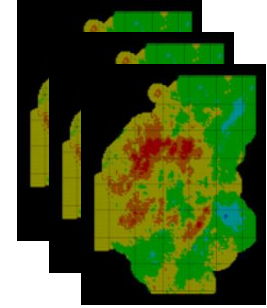
- Precio de commodities
  - Costo de insumos
  - Tasas de cambio



# Incertidumbres

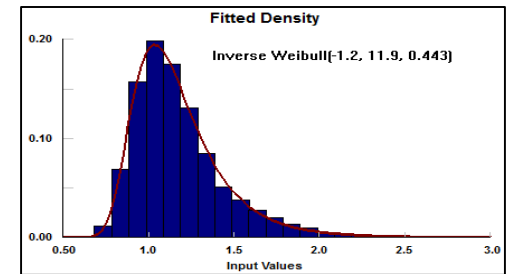
## Geológica

- Simulación Geoestadística



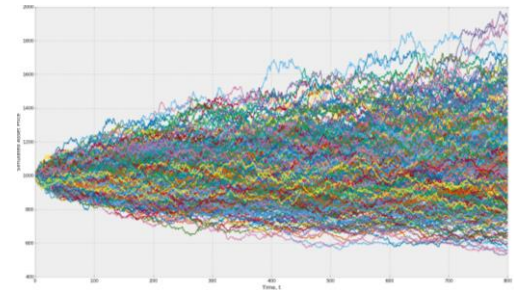
## Operacional

- Distribuciones de probabilidad
- Modelo de Indisponibilidad



## Mercado

- Curvas de precio/costos
- Tasas de cambio



# Optimización y Simulación

- **Optimización** → Busca **la mejor solución** para alcanzar un **objetivo** sujeto a ciertas **restricciones**.

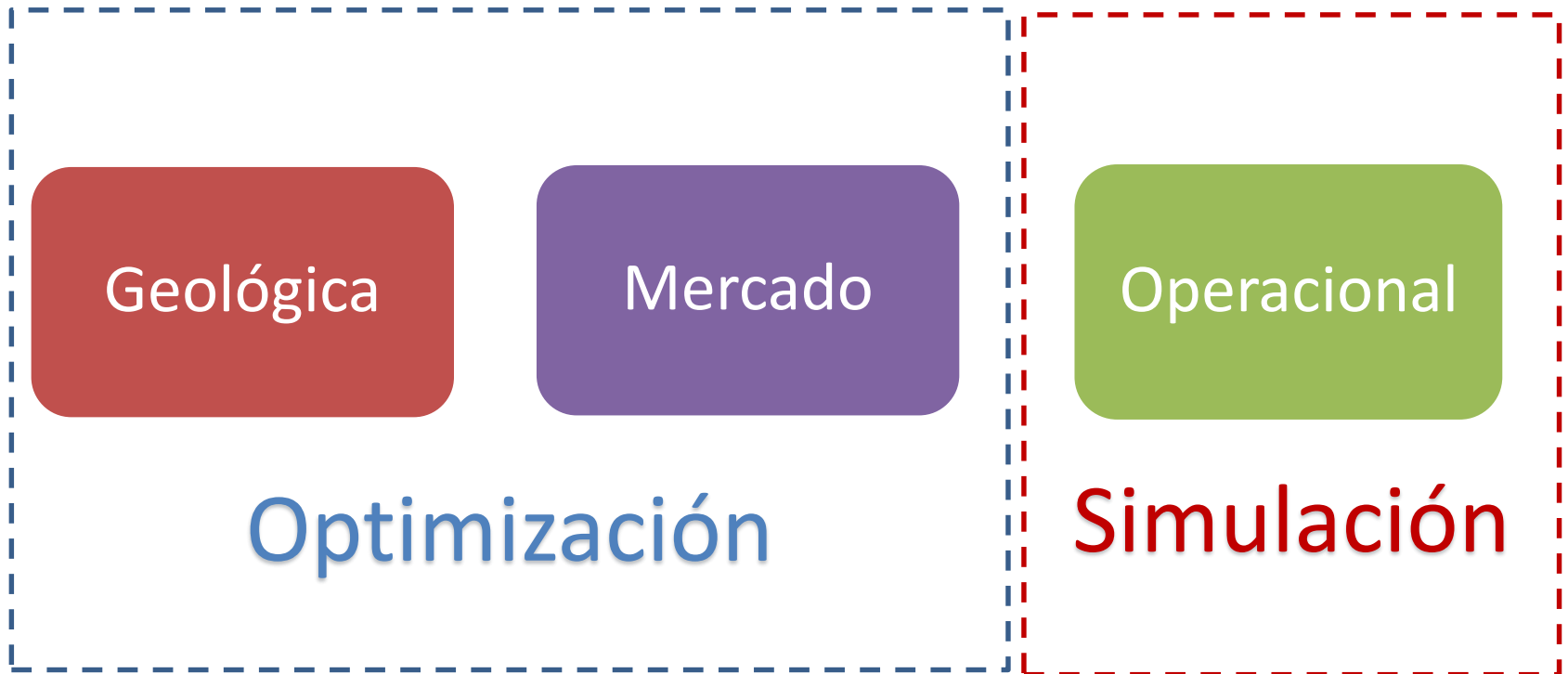
*¿Qué es lo mejor que puedo hacer?*

- **Simulación** → Muestra **la respuesta** de un **sistema** bajo ciertas **condiciones**.

*¿Qué pasa sí?*



# Optimización o Simulación



# Optimización en Planificación Minera

- Técnicas de Optimización:
  - Minimización de desviaciones
  - Aversa al Riesgo
  - Programación Estocástica



**fcfm**

Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

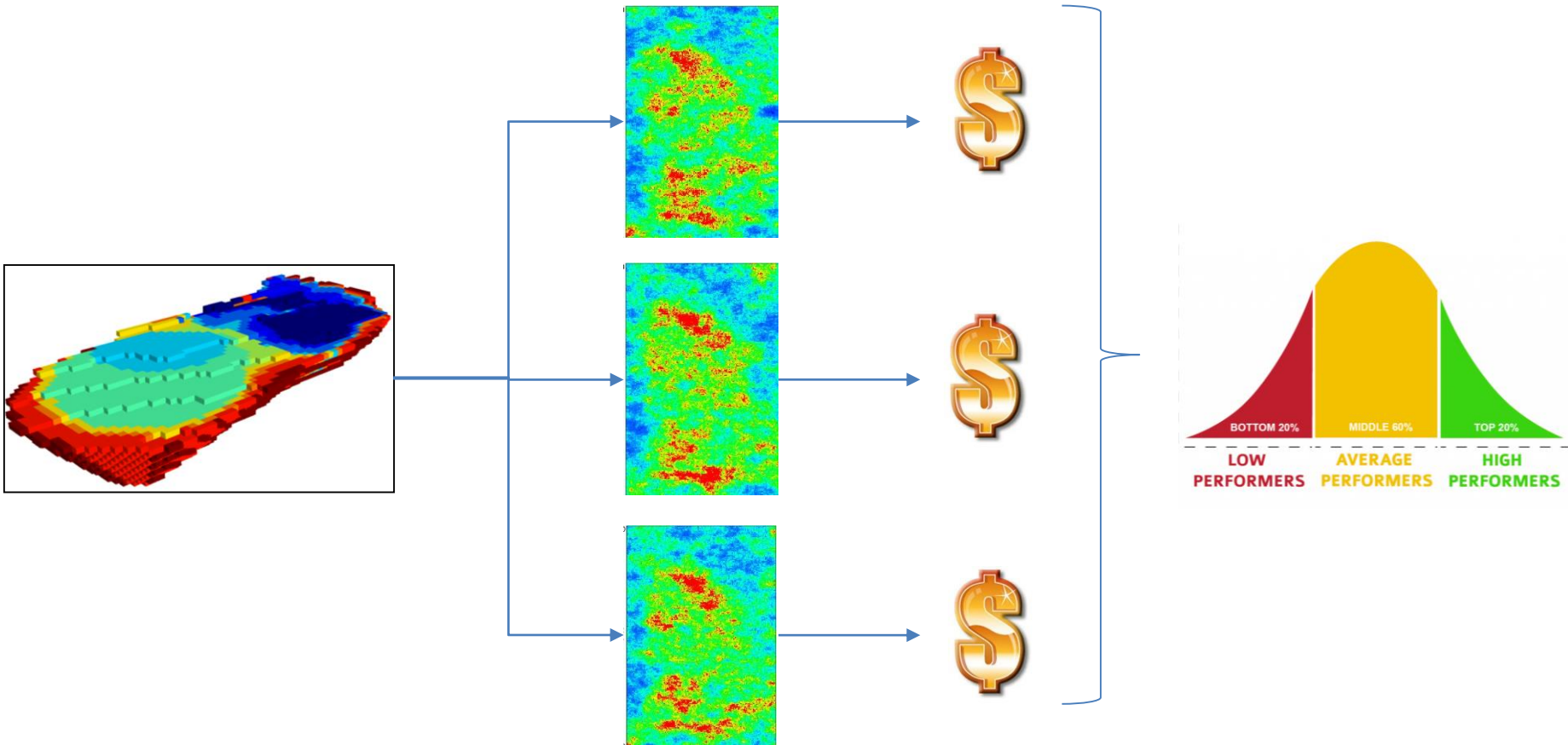


**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

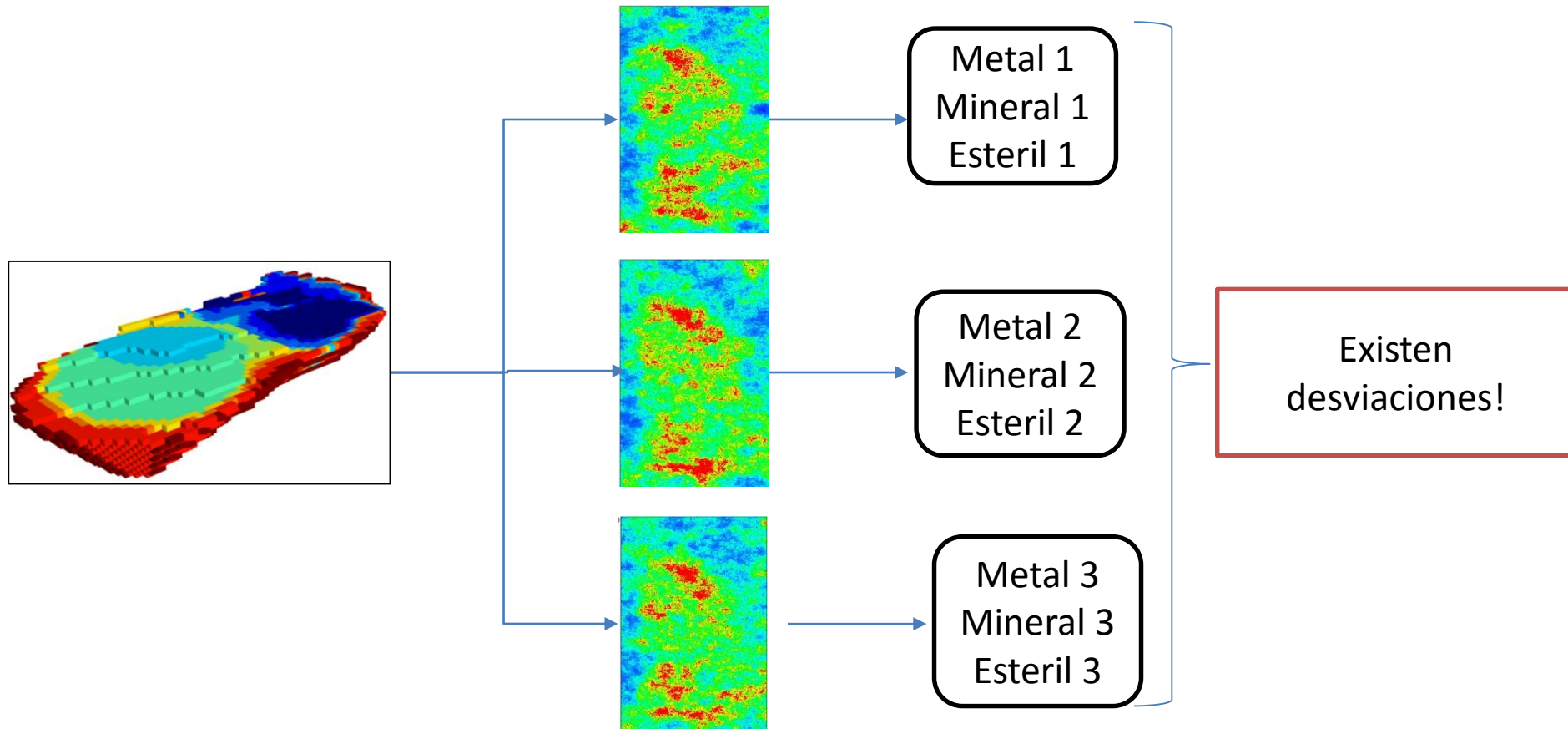
**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER



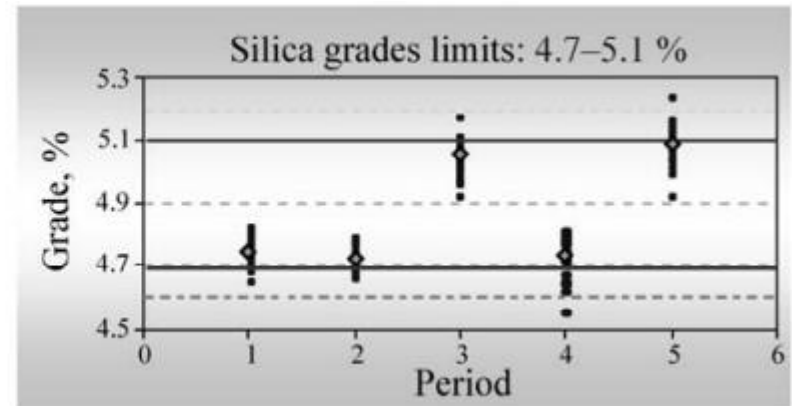
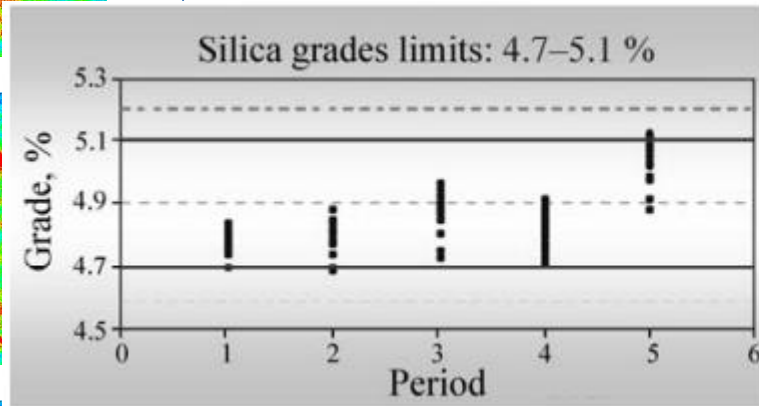
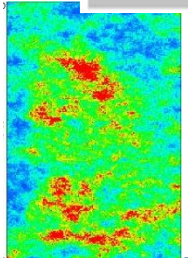
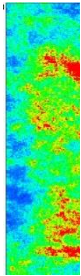
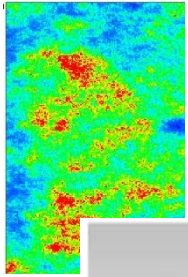
# Análisis de Riesgo



# Minimización de desviaciones



# Minimización de Desviaciones



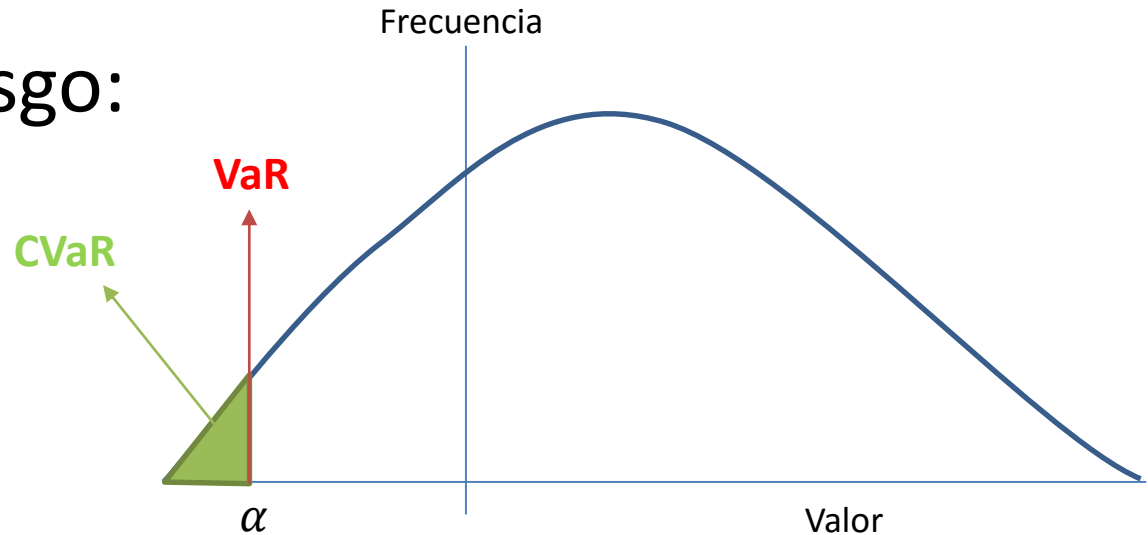
Obtengo un plan que **penaliza** las desviaciones de:

- Mineral
- Metal
- Movimiento Total



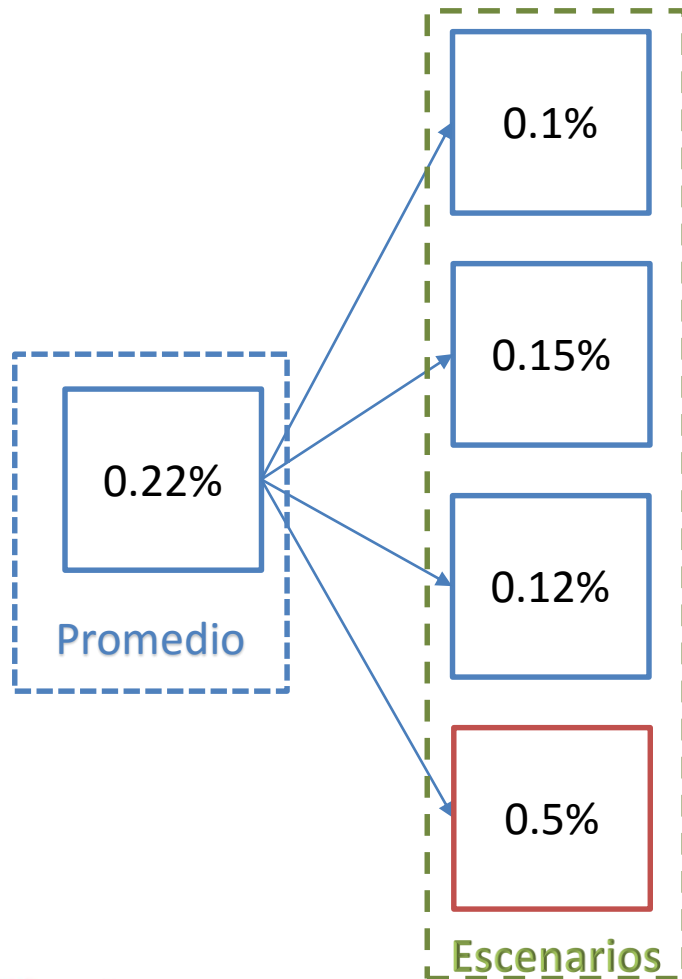
# Aversión al Riesgo

- Medidas de Riesgo:
  - VaR
  - CVaR



- Es posible **minimizar el CVaR** del pit final, sujeto a incertidumbre:
  - geológica 😊.
  - precios 😞.

# Programación Estocástica



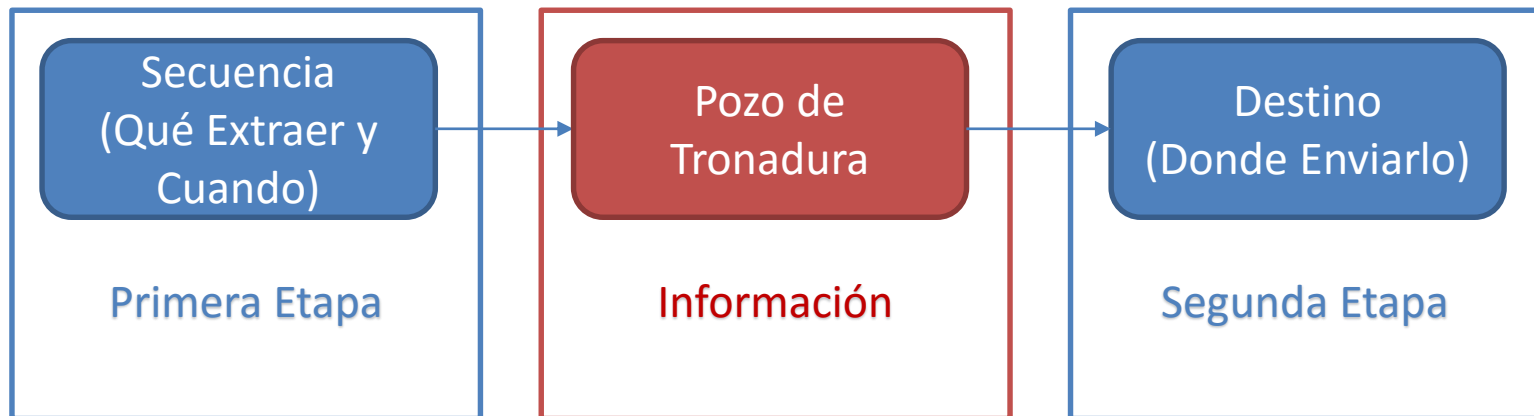
Si la ley de corte es de **0.25%** ...

- ¿Conviene extraer el bloque?
- ¿Qué pasa si consideramos que existe muestreo antes de la decisión de procesar?
- ¿Y si consideramos que este bloque tiene predecesores y sucesores?
- ¿Y el costo de oportunidad de dejar de extraer otros bloques?



# Programación Estocástica

- Proceso de optimización en dos etapas:



- Puede elegir extraer un bloque malo **en promedio** pero con buen potencial.
- Enfoque **Neutro al riesgo**.
- **Valor: 10-15% NPV**



# Limitantes de las técnicas

1. Complejidad computacional.
2. Falta de softwares/herramientas.
3. Inconsistencia en la academia.
4. Innovación en la industria.



**fcfm**

Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

# Simulación

- **Objetivo:** Evaluar la **productividad** de un sistema minero complejo.

## Tradicional

- Se utilizan formulas matemáticas cerradas para calcular productividades
- Distancia equivalente, Velocidades promedio, Utilización

## Simulación

- Los resultados del sistema minero son consecuencia **explícita** de las acciones de los equipos mineros.





# Simulación

## Aplicaciones:

- Evaluar capacidad de Transporte
- Dimensionamiento de flotas de equipo
- Detección de cuellos de botella
- Cuantificación de Incertidumbre
- Evaluar políticas de despacho
- Análisis de Sensibilidad en parámetros operacionales
- Evaluación de planes de contingencia
- Evaluar configuraciones de producción
- Cuantificación de pérdidas operacionales.



# Simulación

- Las técnicas tradicionales de simulación son **complejas y intensivas en tiempo:**
  - Programación del motor de simulación
  - Validación y calibración de la lógica de simulación.
  - Adaptación de softwares generales a problemas mineros.



# DSim: **D**elphos **S**imulator

- Para simplificar el proceso de simulación, el laboratorio Delphos desarrollo un software de simulación enfocado a la minería.
  - Flexible
  - Fácil de usar
  - No se requiere programar lógicas de movimiento
  - Reportes personalizados
  - Adaptabilidad



**fcfm**

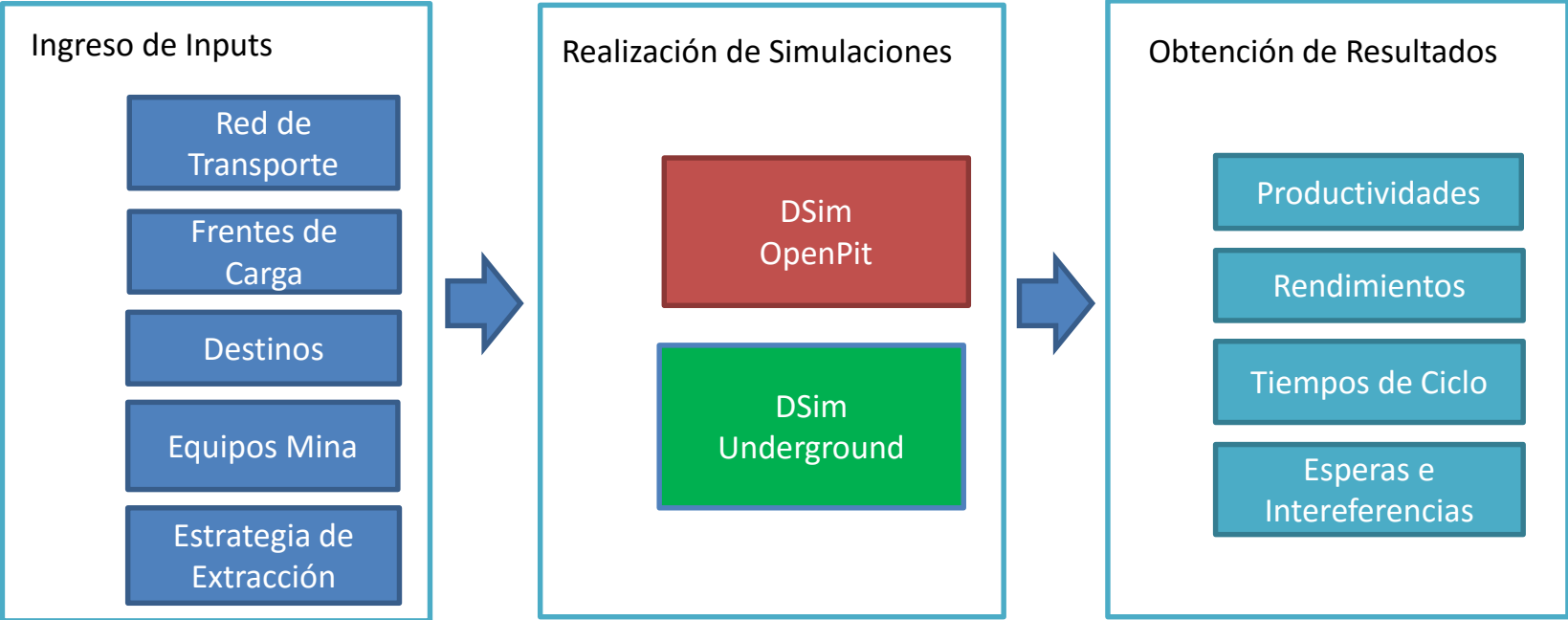
Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



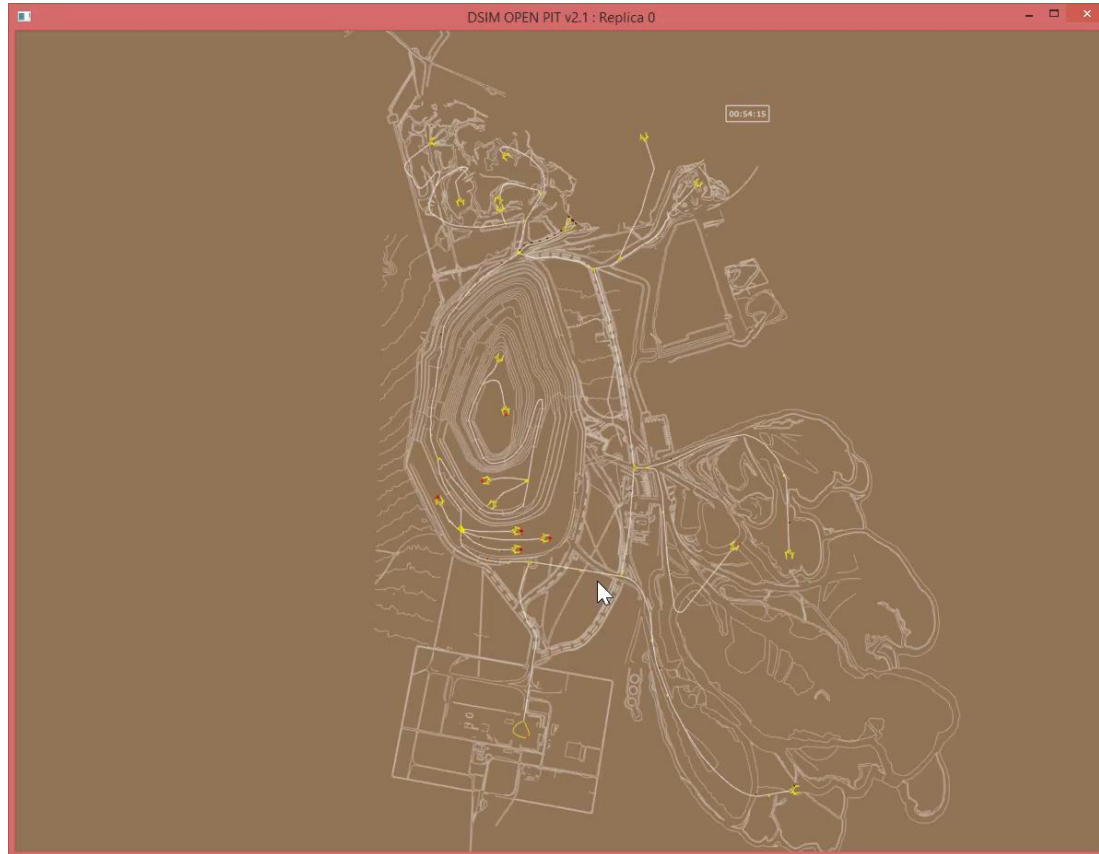
**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

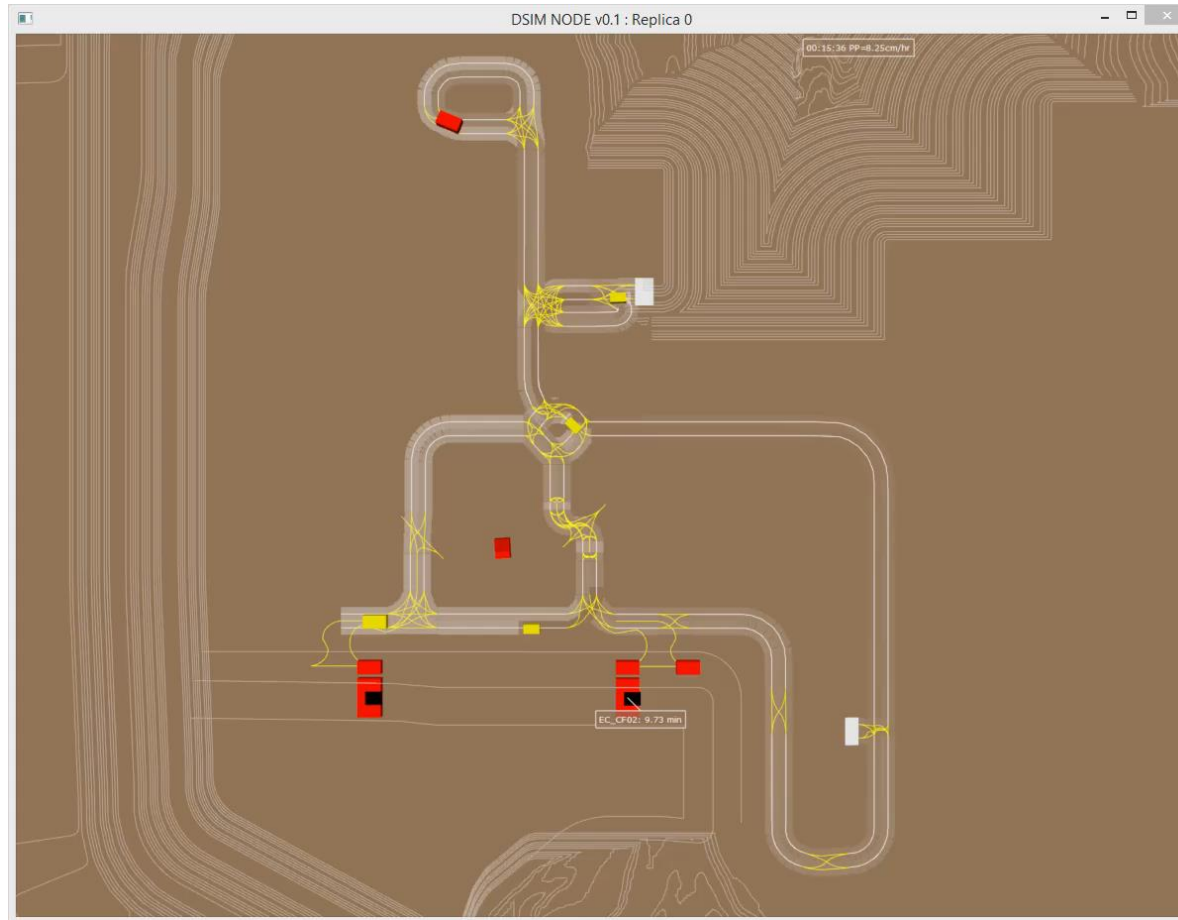
# Dsim: Uso



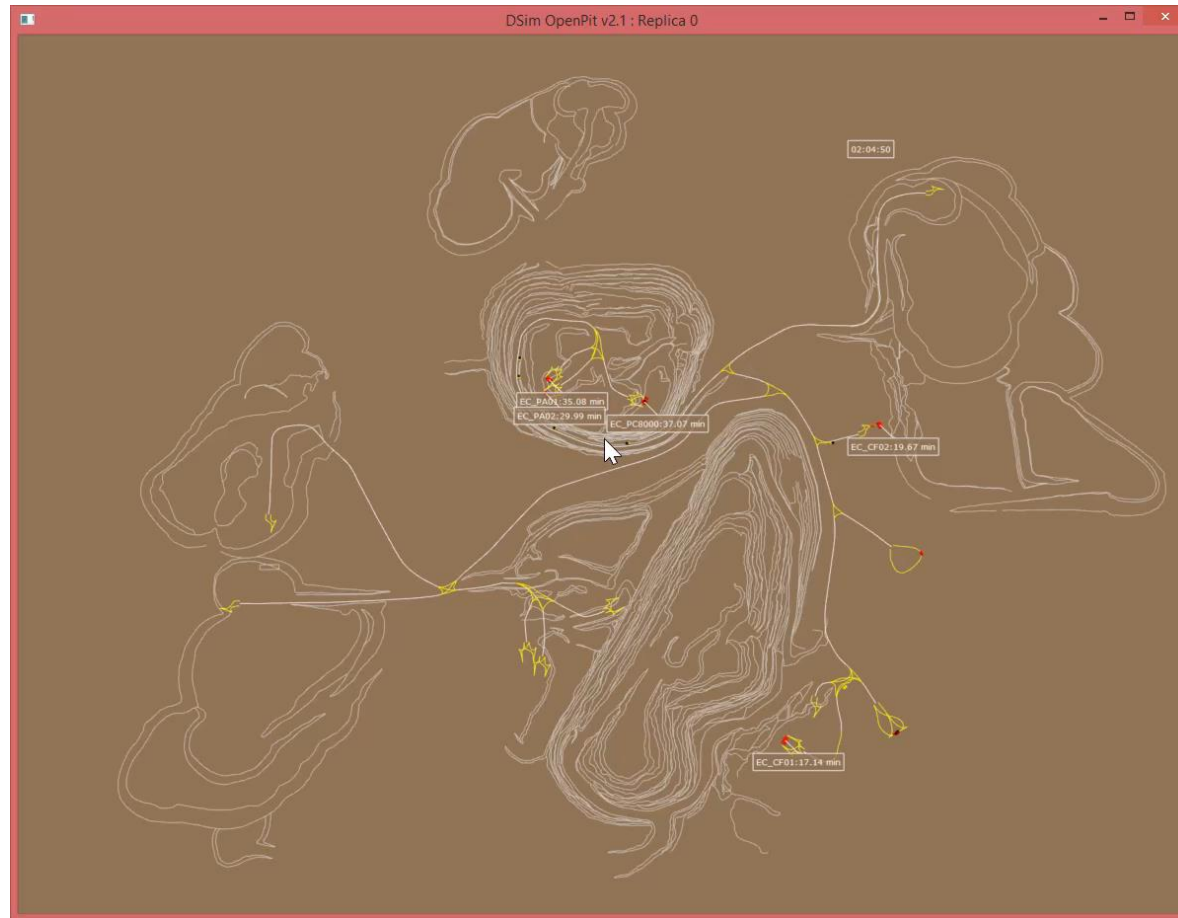
# Dsim: Ejemplo 1



# Dsim: Ejemplo 2



# Dsim: Ejemplo 3



# Limitantes de la simulación

1. Requiere datos históricos/distribuciones de probabilidad para parámetros\*
2. Requiere modelo de fallas/mantenciones.
3. Es intensiva en tiempo.



**fcfm**

Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER



# Reflexión Final

Helmut Lerchs\*  
Manager of Scientific Services,  
Montreal Datacentre,  
International Business Machines  
Co. Ltd.,

Ingo F. Grossmann  
Manager,  
Management Science Applications,  
International Business Machines  
Co. Ltd.

## Optimum Design of Open-Pit Mines

Joint C.O.R.S. and O.R.S.A. Conference,  
Montreal, May 27-29, 1964



**fcfm**

Ingeniería de Minas  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**DELPHOS**  
Laboratorio de Planificación Minera

**amtc**  
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER