

¿Qué es la planificación bajo incertidumbre?

Nelson Morales

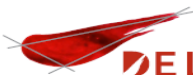
Director Laboratorio de Planificación Delphos
DIMIN & AMTC
Universidad de Chile



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

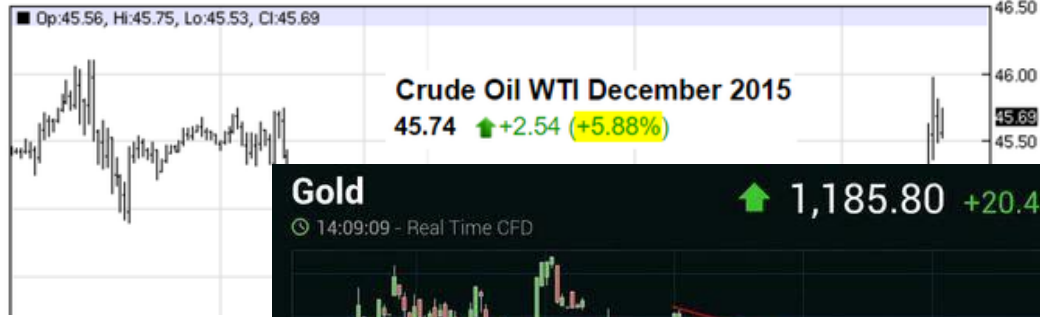


DELPHOS
laboratorio de planificación minera

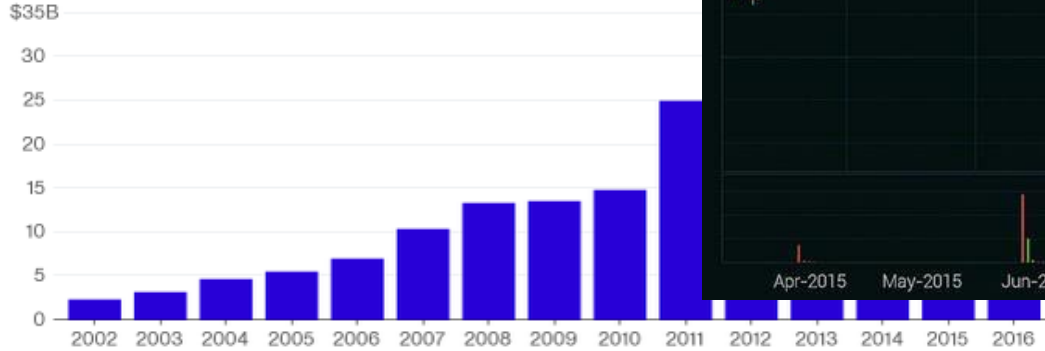
amtc
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

China consumption growth 201

Gasoline
Kerosene
Zinc***
Aluminium
Soybean*
Coffee*
Nickel**
Oil (total)



Copper Mining Party Ends as Capex for Expansion Capital expansion for new endeavors dries up by more than 50%



Source: Citigroup



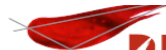
Bloomberg



fcjm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
Laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

¿Cuánto vale un bloque?

$$B = (P - C_V) \cdot R \cdot g \cdot F \cdot T - (C_M + C_P) \cdot T$$

Recuperación

Precio Ley Tonelaje Costos

Costo Venta Factor Ton/lb Tonelaje

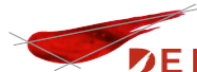
En rojo, los valores que conocemos con certeza.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

¿Por qué considerar la incertidumbre?

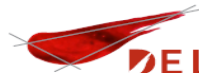
- Los **promedios** tienen **probabilidad** de ocurrencia **CERO**.
- Es mejor estar **aproximadamente en lo correcto** que precisamente equivocado.
- Al considerar la incertidumbre, nuestra **mejor decisión para hoy es diferente**.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Mini-Ejemplo

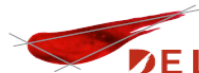
- Debemos decidir x (cuánto producir), pero D (la demanda) es incierta.
- Sabemos los costos:
 - $C(x)$ de prod. (USD 100/u)
 - $B(x-D)$ de no cumplir (USD 1,000/u)
 - $H(D-x)$ de almacenar (USD 10/u).

- Costo Total es

$$G(x,D) = C(x) + B(x-D) + H(D-x)$$

- Distribución de la demanda es

$$D \sim N(50, 10)$$



Mini-Ejemplo (cont.)

Produzcamos lo esperado: 50

| SIM | D | G |
|-----|-----|--------|
| 1 | 60 | 14.590 |
| 2 | 37 | 5.131 |
| 3 | 19 | 5.311 |
| 4 | 60 | 14.952 |
| 5 | 46 | 5.040 |
| 6 | 55 | 9.775 |
| 7 | 51 | 6.247 |
| 8 | 40 | 5.099 |
| 9 | 54 | 9.020 |
| ... | ... | ... |
| 100 | 60 | 14.663 |

| | |
|---|------|
| c | 100 |
| b | 1000 |
| h | 10 |

x 50 G PROMEDIO 8.501



fcjm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

¿Hay que producir más, pero cuanto?

- Es peor quedar corto (pago 1000) que pasado (pago 10).
- En este caso, el óptimo es $x=62$.

| | |
|---|-------|
| c | 100 |
| b | 1.000 |
| h | 10 |

x 62 G PROMEDIO 6.942

amtc
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Las ***tres*** fuentes de incertidumbre

Fuentes

- Geología
 - Leyes
 - Mineralogías
- Mercado
 - Precio y Costos
- Operación
 - Equipos
 - Costos
 - Clima

Tipos

- Endógena:
 - Originada “por nosotros mismos”
- Exógena:
 - Dada por las condiciones externas.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

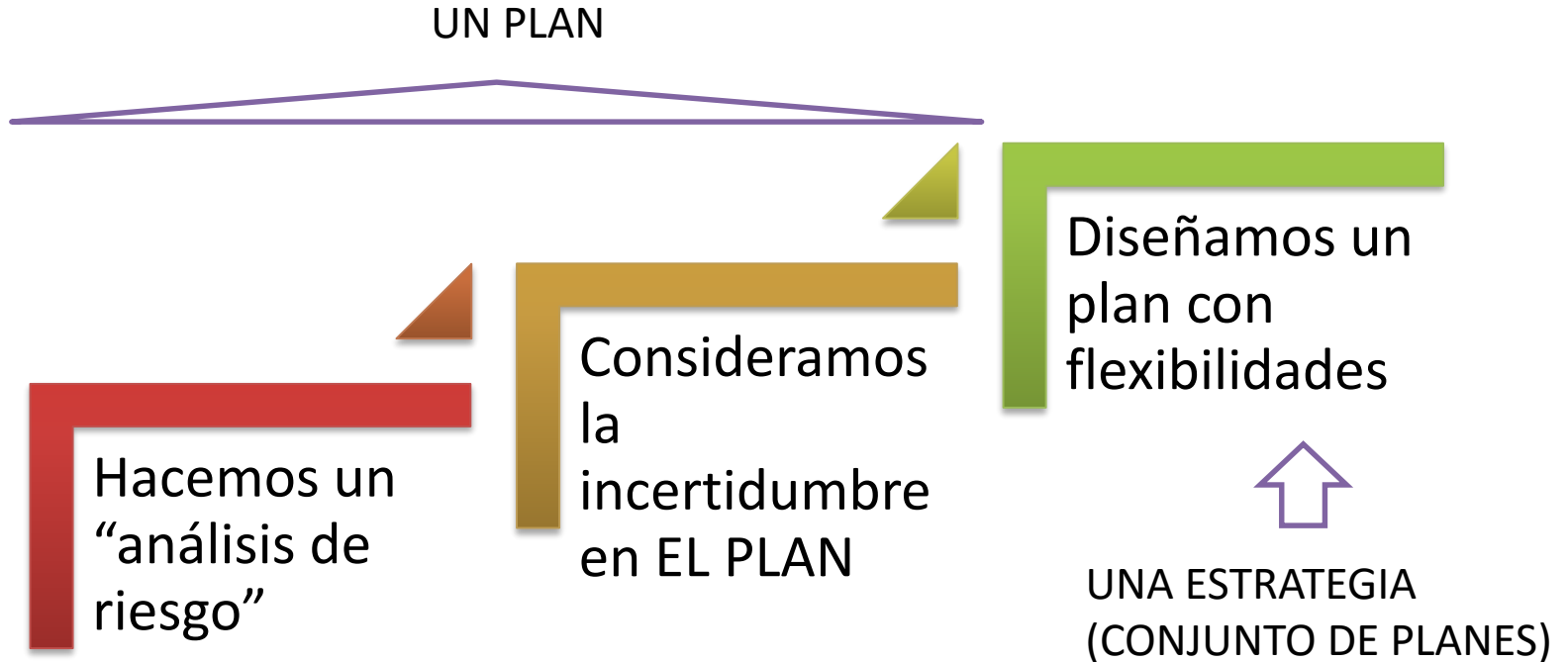


DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

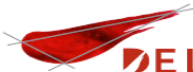
¿Cómo planeamos? *Tres* niveles



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



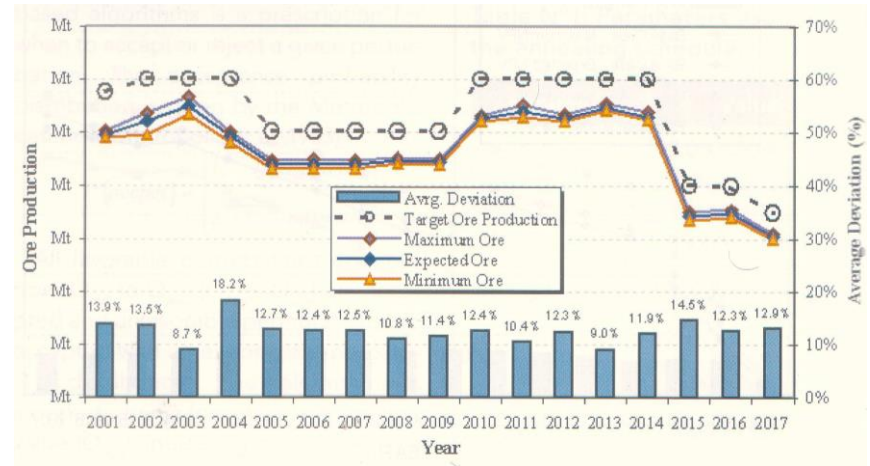
DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Análisis de Riesgo

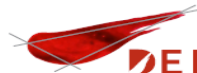
- Base utilizando un modelo tradicional: Se estima una variabilidad de hasta 1,3 MTon por año, mostrando repercusiones en la planta metalúrgica.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



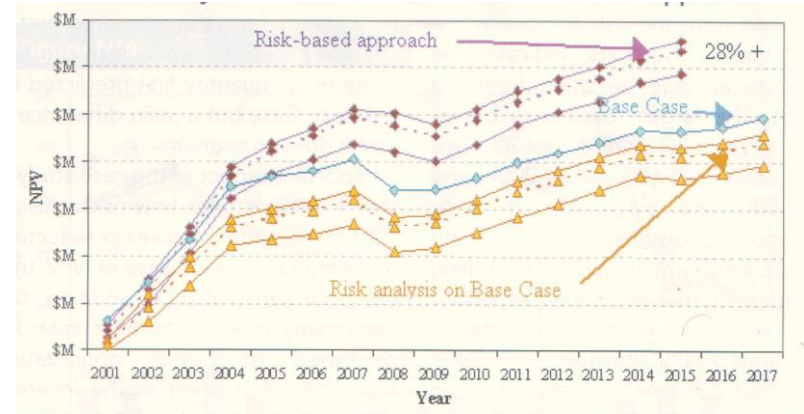
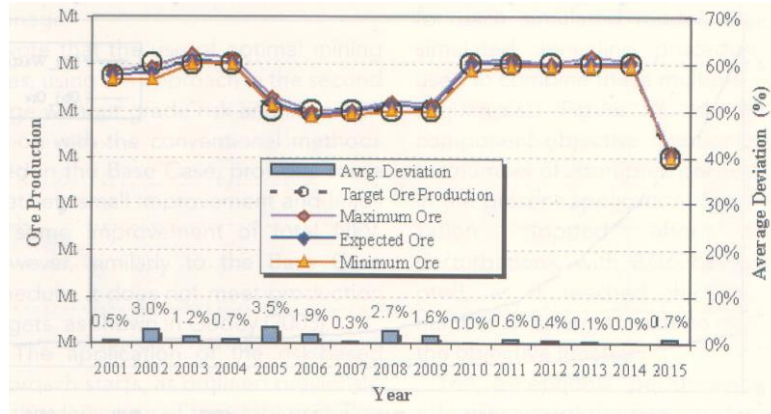
DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

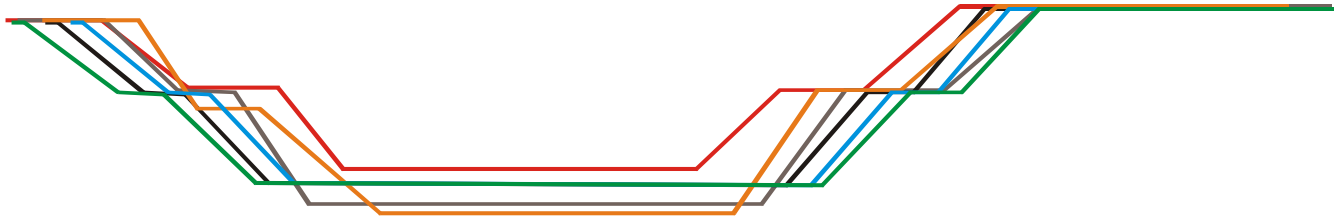
Plan considerando incertidumbre

- Análisis de riesgo del caso base, utilizando una serie de modelos de bloques: Se estima una variabilidad de hasta 0,4 MTON por año
- Incertidumbre en VAN: Modelo tradicional versus análisis de riesgo



Fit final “confiable”

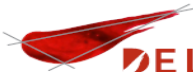
- Considerar varios modelos de bloques equiprobables de las simulaciones
- Optimizar con algún método
- La intersección de ellos entrega una confiabilidad de un 100% de los recursos contenidos en la envolvente



fcfm

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

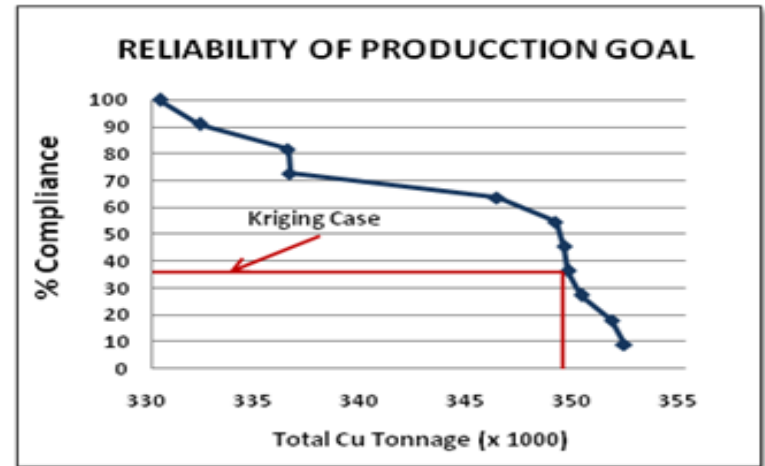
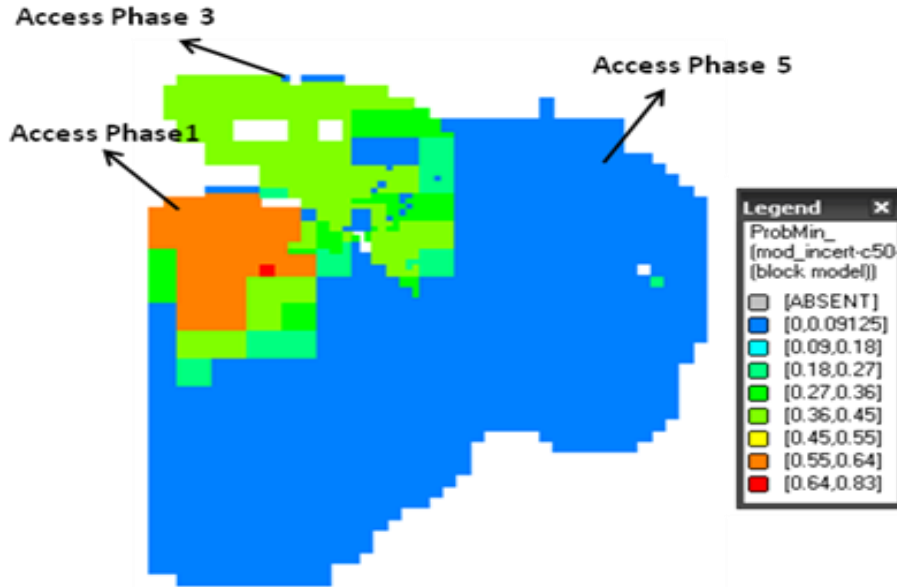
Ingeniería de Minas



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

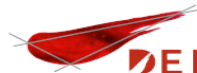
Mapas de probabilidad y confiabilidad de la producción



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Un plan → Tradeoff



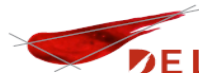
- En la medida de que construimos planes (rígidos) más confiables, esta robustez se paga con valor (ej. caída en el VAN Esperado).
- ¿Por qué hacer un plan (rígido) cuando sabemos que vamos a cambiarlo en el futuro?



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Incertidumbre Operacional

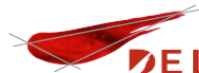
- *“Al final, cuando revisamos por qué no se cumplen los planes, siempre es porque falló algún equipo”*
- La complejidad de las operaciones crece en el tiempo
 - Rajos más profundos: ¿Cómo optimizar la operación con 300 camiones? ¿Se puede?
- ¿Qué hacer frente a eventos de nieve? ¿Un alud?
- ¿Cómo afecta la incorporación de tecnología (ej. autónoma) la producción y los costos?
- **¿Se puede controlar el riesgo de un colapso y maximizar el VAN, al mismo tiempo?**



fcfm

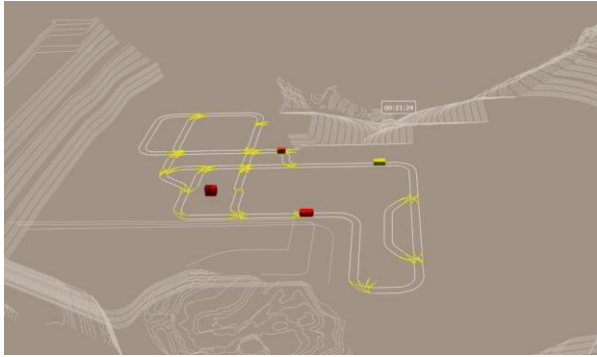
Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

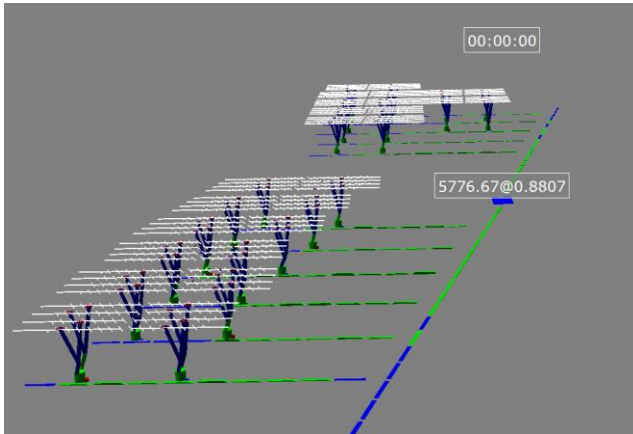


DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER



Simulación para comprender el sistema y proyectar decisiones de corto plazo en largo plazo. Interacción entre modelos de optimización (asignación) y simulación.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Plan con flexibilidades

Objetivo

- Definir estrategias:
 - Dimensionar coberturas
 - Dejar abiertas alternativas
- Generar una evaluación del proyecto más precisa:
 - Potencialmente más alta
 - Con menor riesgo/varianza.

Ejemplos

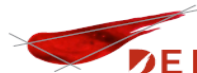
- Opciones Reales
 - Pago/Inversión inicial para generar una alternativa futura.
- Programación Estocástica
 - Decisiones duras v/s decisiones adaptativas a los escenarios



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Planificación Estratégica

Dollar Driven Mine Planning: The Corporate Perspective to Operational Mine Planning

By T P Horsley ¹

Strategic Planning

There are many different views and definitions of *strategic planning*. The definition I use is:

“positioning to take advantage of possible future outcomes “

These outcomes may be discrete events, such as a change in
environment, or gradual changes over time, such as a change in



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



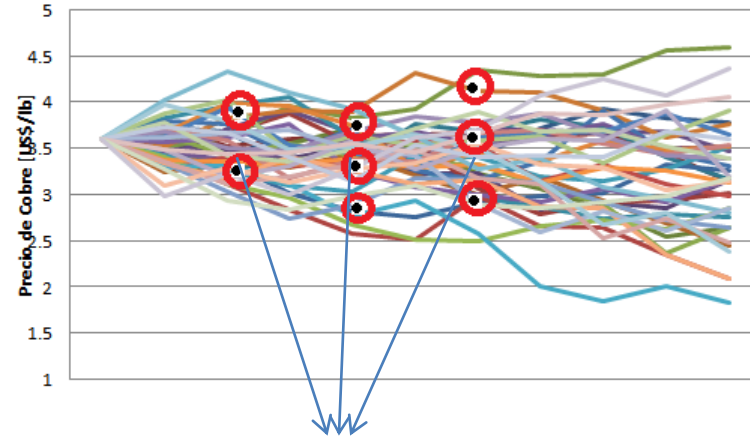
DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Ejemplo 1 – Escenarios de Inversión frente a incertidumbre de precios

- Complejo minero con múltiples faenas que comparten recursos (planta, transporte RRHH, budget).
- Proyectos entran en cierto orden y restricciones (x% avanzado en uno antes de poder iniciar otro)
- Horizonte de planificación > 70 años.
- Los precios, ¿afectan las partidas? ¿Se deben ejecutar todos los proyectos? ¿cómo impacta a las reservas?



Prob ($P_t > P^*$) : E(VAN) Opción i

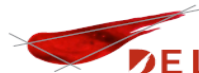
Prob ($P_t < P^*$) : E(VAN) Opción i



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
Laboratorio de planificación minera

amtc

ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

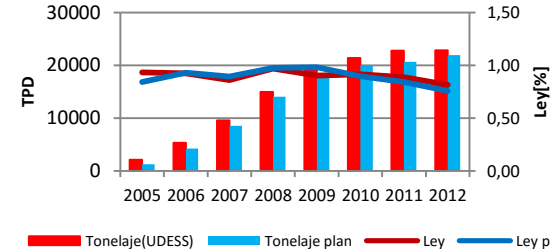
Proyecto “4”

| Caso | 2033 (Decisión 2 años antes) | 2034 (Decisión 1 año antes) | Requerimiento | Probabilidad de No realización de proyecto |
|------|---------------------------------|--------------------------------|---------------|--|
| 1 | Precio < 2.75 | Precio < 2.75 | D1 y D2 | 35% |
| 2 | Precio < 3 | Precio < 3 | D1 y D2 | 25% |
| 3 | Precio < 2.75 | Precio < 2.75 | D2 | 31% |
| 4 | Precio < 3 | Precio < 3 | D2 | 21% |

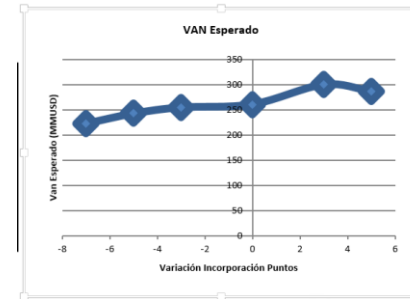
Ejemplo 2 – Opciones frente a incertidumbre Operacional

- Mina subterránea, incertidumbre operacional (disponibilidad de puntos de extracción).
- ¿Cuánta área preparar para cubrirse? ¿Cuál es la flota de equipos asociada?

Plan de producción(UDESS)/ Planificado



| Delta Pts. | VAN |
|------------|-----|
| -7 | 223 |
| -5 | 243 |
| -3 | 255 |
| 0 | 261 |
| 3 | 300 |
| 5 | 287 |



... Finalmente...

¿Qué es la planificación
bajo incertidumbre?

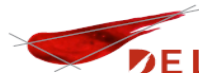
- Consiste en mejorar nuestras decisiones presentes incorporando apropiadamente la variabilidad futura.
- En realidad... es la única que existe...
- ... pero
 - Hay herramientas que permiten incorporarla a la planificación y
 - Optimizar o generar coberturas.



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc

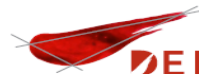
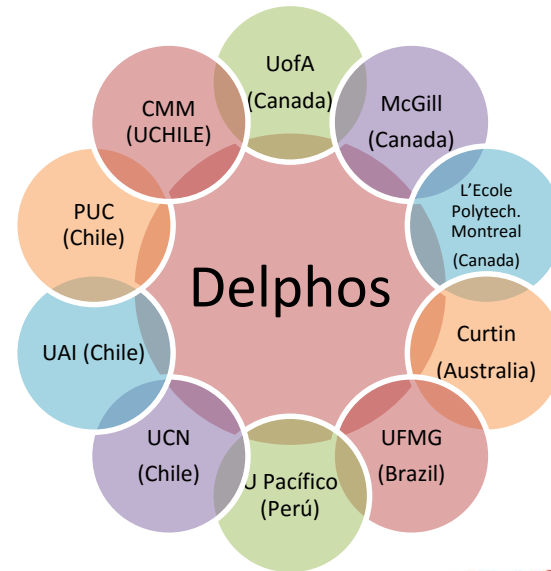
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER

Delphos

Gente

- Maximiliano Alarcón, Ing. Minas
- Alejandro Ehrenfeld, Ing. Eléctrico
- Nelson Espejo, Ing. Matemático
- Diego Mancilla, Ing. Matemático (MSc)
- Fabián Manríquez , Ing. Minas (MSc)
- Gerson Morales, Ing. Ingformática
- *Nelson Morales, Ing. Matemático (PhD)*
- Pierre Nancel, Ing. Matemático (PhD)
- Andrés Parra , Ing. Minas (MSc)
- Consuelo Moreno, Ing. Matemático
- Emilio Vargas , Ing. Minas (MSc)

Colaboradores



¿Qué es la planificación bajo incertidumbre?

Nelson Morales

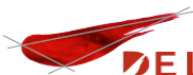
Director Laboratorio de Planificación Delphos
DIMIN & AMTC
Universidad de Chile



fcfm

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



DELPHOS
laboratorio de planificación minera

amtc
ADVANCED MINING TECHNOLOGY CENTER