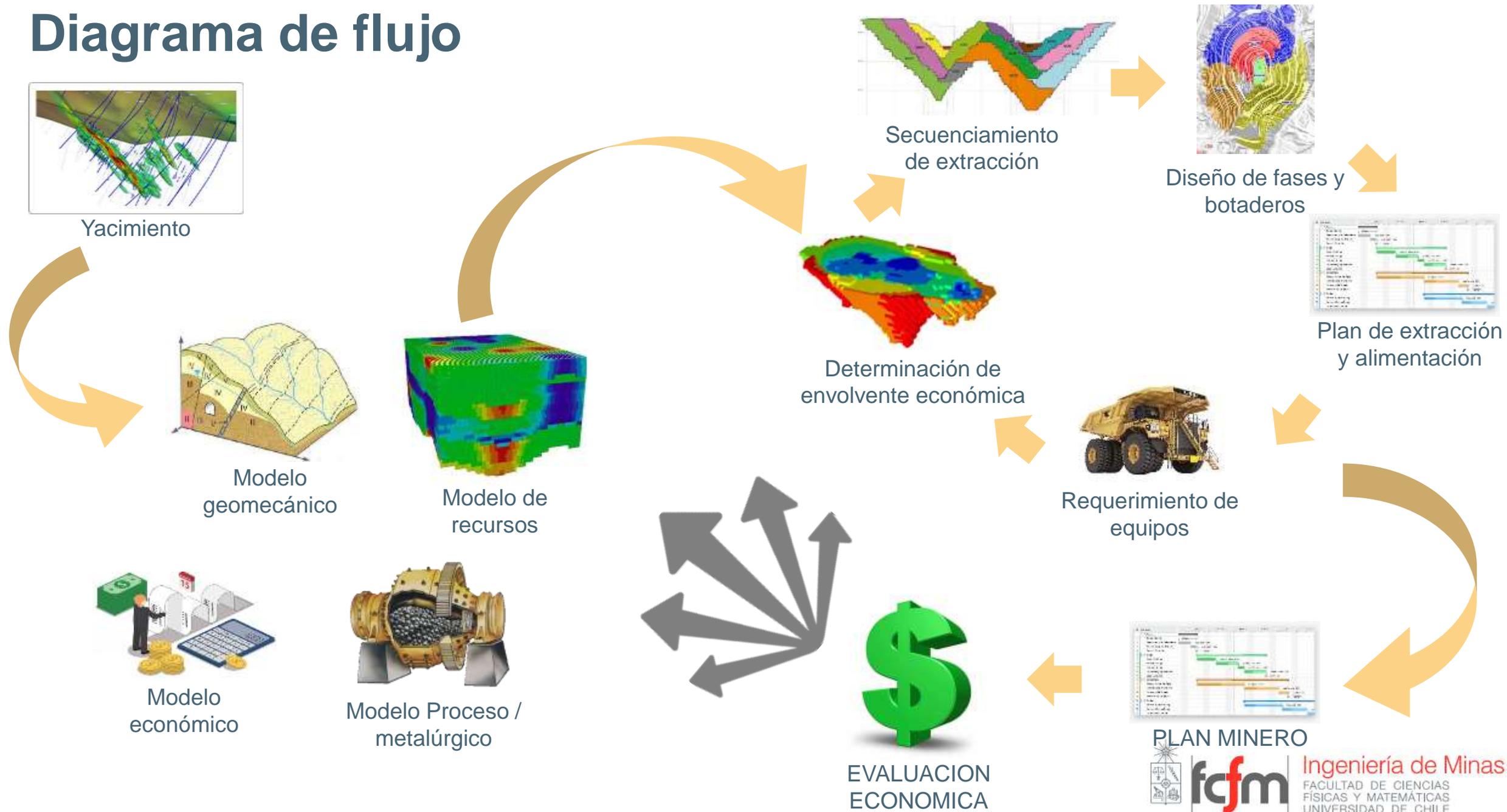


# Diseño y Planificación de Minas a Cielo Abierto

Envolvente económica y leyes de corte

Prof. Juan Luis Yarmuch

# Diagrama de flujo



# Valorización económica

- **Ingresos pueden ser calculados de:**
  - Tonelajes
  - Leyes
  - Recuperaciones
  - Precio del producto
- **Costos pueden ser calculados de**
  - Costos de minería
  - Costos de procesamiento
  - Costos de metalurgia
  - Costos generales

# Valorización de un bloque

- **El valor debe ser calculado asumiendo que el bloque está descubierto.**
  - El valor acumulado de una envolvente económica corresponderá a la suma de los valores individuales de cada bloque
  - Restricciones de geometría de la envolvente (precedencias) determinará que otros bloques deben extraerse para la extracción de un bloque determinado
- **El valor debe ser calculado suponiendo que será explotado.**
  - Pero no necesariamente conocemos su destino (pero podemos hacer un buen supuesto)
- **El costo en la detención de la mina, planta o venta debe ser contabilizada en la valorización de un bloque.**

# Valorización de un bloque

- **Costos de extracción:**
  - Perforación
  - Tronadura
  - Carguío
  - Transporte
  - Mantención de los caminos
  - Botaderos
  - Bombeo de aguas
  - Costos general de la mina
  - Amortización y depreciación
  - Etc.

# Valorización de un bloque

- **Costos de concentración**
  - Movimiento desde stockpile
  - Molienda
  - Flotación
  - Espesadores
  - Filtración
  - Secadores
  - Costos generales de la planta de concentración
  - Amortización y depreciación

# Valorización de un bloque

## Costos de metalurgia

- **Costos de fundición y refinación (necesarios para operaciones con concentración por flotación)**
  - Transporte del concentrado
  - Costos generales de fundición y refinería
  - Amortización y depreciación
  - Perdidas de la fundición y refinería
  - Transporte del cobre blíster
  - Créditos y cargos de la fundición
  - Etc.
- **Costos de SX-EW (necesarios para operaciones con lixiviación)**
  - Extracción por solventes
  - Electro-obtención
  - Transporte de cátodos
  - Costos generales de SX-EW
  - Amortización y depreciación
  - Etc.

# Valorización de Bloques

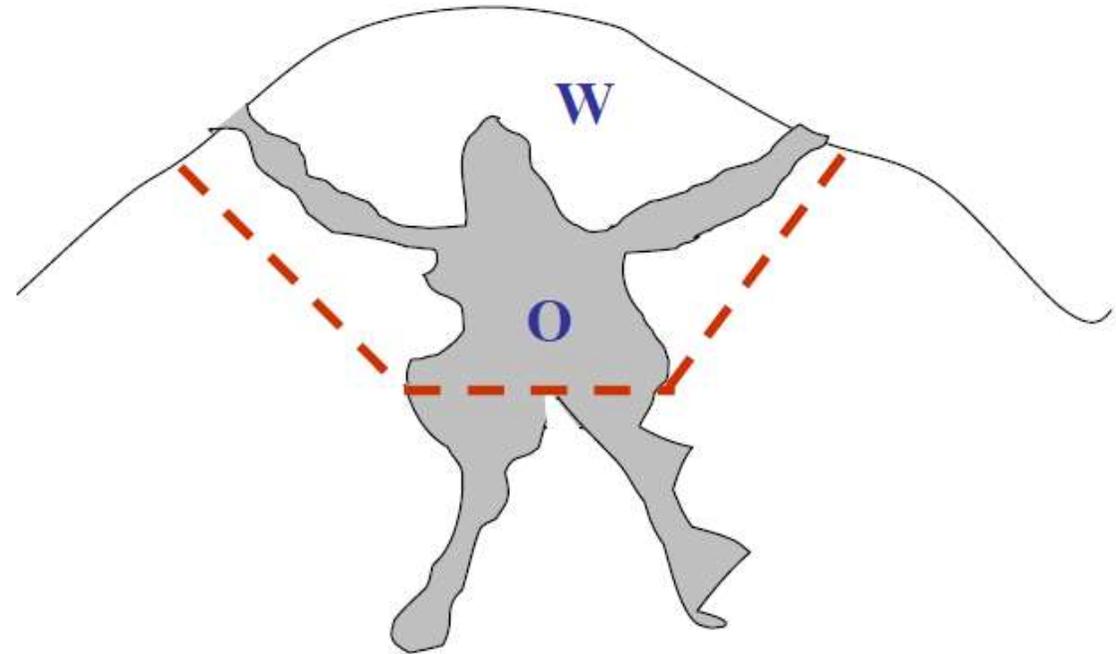
- **El costo de mina es el costo de mover un bloque de estéril todo el resto de los costos involucrados en la extracción se deben asignar al costo de planta.**
  - $C_m$ , costo mina \$/t minada
  - $C_p$ , costo planta \$/t procesada
  - $C_v$ , costo de ventas (metalurgia + marketing) \$/lb vendida
  - $R$ , recuperación metalúrgica
  - $L_m$ , ley media
  - $P$ , precio
- **Ejercicio: ¿como se calcula el beneficio de un bloque en función de lo anterior?**

# Pit final como envolvente económica

- **Previo al diseño operativo normalmente se selecciona un límite de pit final (cono) que corresponde a la envolvente económica del depósito (para los parámetros considerados)**
  - Máximo beneficio (90% de los casos)
  - Cantidad determinada de mineral
    - Limitaciones de espacio o permisos
  - Costo menor que un determinado límite
  
- **¿Como encontramos este límite?**

# Envolvente Económica

- **Metodologías tradicionales**
  - Diseño manual (plantas)
  - Computacionales:
    - Cono Flotante Positivo
    - Cono Flotante Negativo
    - Cono Flotante Optimizante
    - Pseudo-Flow
    - Lerchs & Grossmann



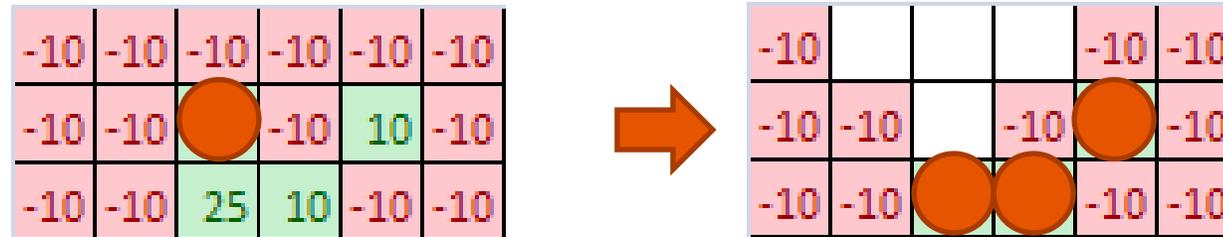
**fcfm**

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

# Cono Flotante Positivo

- **CFP:**

- Algoritmo propuesto en los años 60
- Algoritmo simple y con resultados satisfactorios (no entrega el “óptimo”)
- Se basa en las sumas acumuladas de bloques
- Método depende de la secuencia



# Cono Flotante

- **Cono Flotante Negativo (CFN)**
  - Proceso inverso
    - Comienza con el pit excavado
    - Rellena las paredes
  - Mayor tiempo computacional
  - Ambos métodos (CFP vs CFN) no generan los mismos resultados
    - Problema: Conos que comparten sobrecarga

## Cono Flotante Optimizante

- Desarrollado por M. Lemieux
- Analiza ambos métodos simultáneamente
- Aborda el problema de superposición de sobrecarga



**fcfm**

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

# Lerchs & Grossmann

- **Supuestos:**

- Precios y costos fijados para cada bloque (una vez).
- Maximiza la envolvente en función del beneficio.

- **L&G 2D**

- A partir del modelo de bloques se representan secciones transversales con beneficios ( $m_{ij}$ )
- Se construye la matriz de beneficios acumulados sumando por columnas de arriba hacia abajo ( $M_{ij}$ )
- Se calcula de derecha a izquierda, de arriba hacia abajo el valor  $P_{ij}$  para cada bloque, donde:

$$P_{ij} = M_{ij} + \max(P_{i+r,j-1}) \text{ con } r = -1, 0 \text{ y } 1$$

- Si ( $\text{Max } P_{1j} > 0$ )
  - Se selecciona  $\text{Max } P_{ij}$  y se recorre la matriz  $P$  siguiendo los máximos vecinos.
- Si ( $\text{Max } P_{1j} < 0$ ) no existe pit de máximo beneficio.

$m$

-10	-10	-10	-10	-10	-10
-10	-10	40	-10	10	-10
-10	-10	25	10	-10	-10

$M$

-10	-10	-10	-10	-10	-10
-20	-20	30	-20	0	-20
-30	-30	55	-10	-10	-30

$P$

0	0	0	0	0	0
5	10	-10	10	-10	-10
-5	15	20	-30	-10	-20
-15	5	35	-20	-30	-30

-10				-10	-10
-10	-10		-10	10	-10
-10	-10	25	10	-10	-10



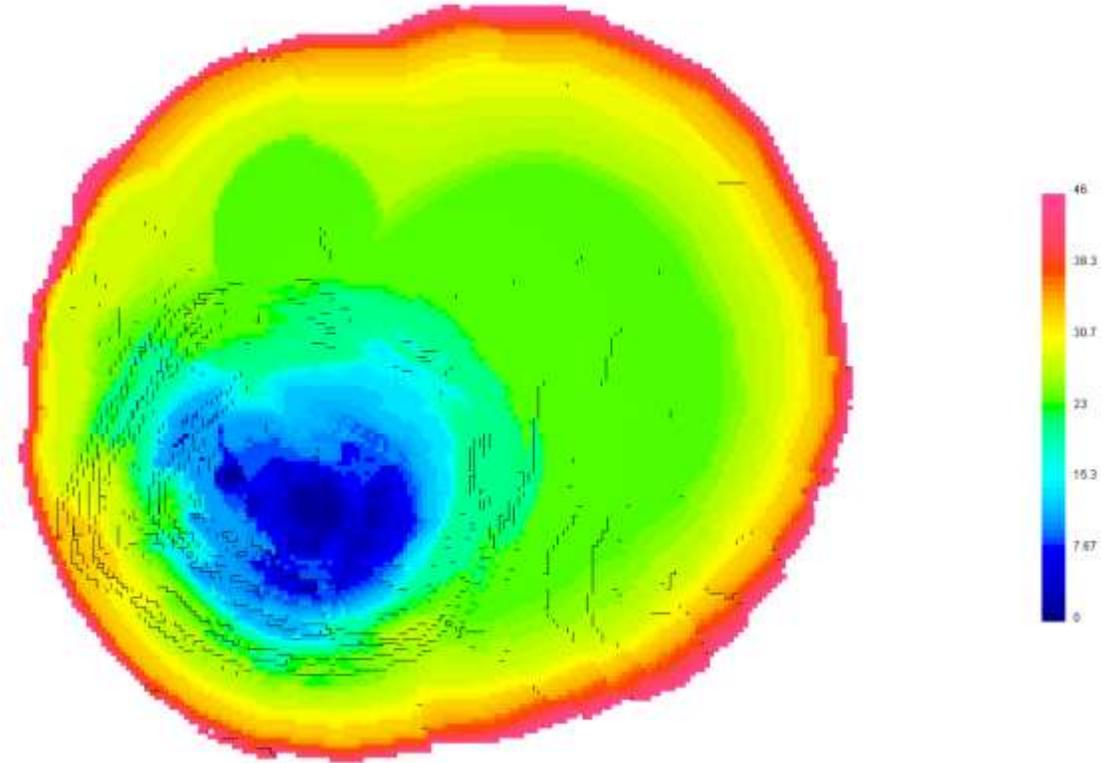
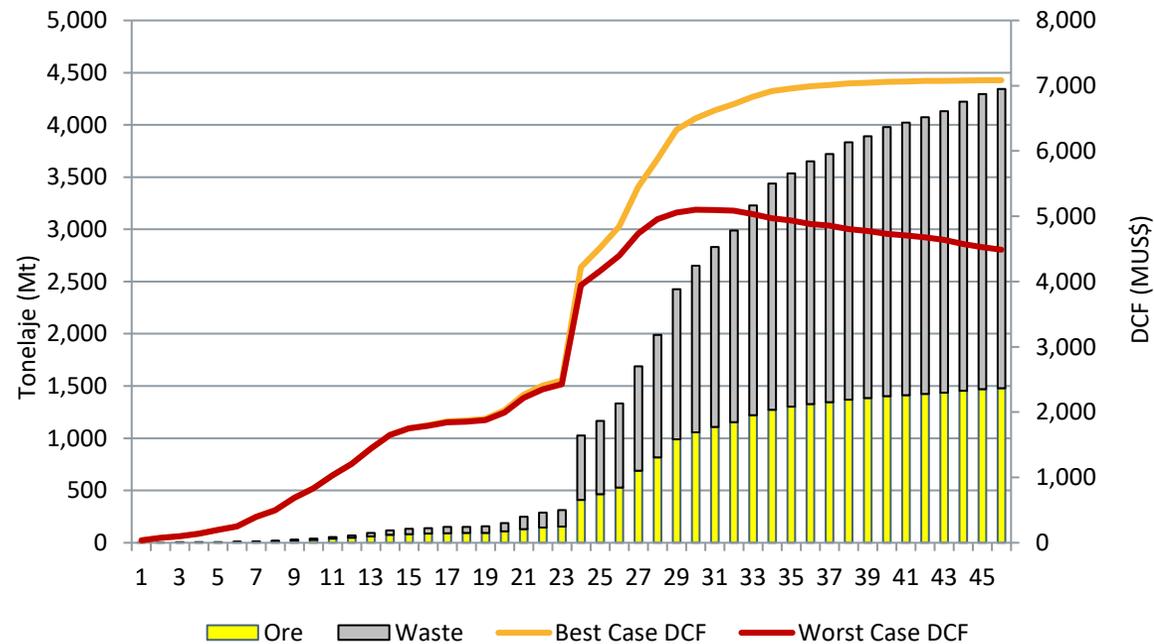
# Sin embargo....

- **L&G responde si el bloque debe salir.**
- **Pero nos falta saber:**
  - ¿Cuándo debe salir?
  - ¿Existe capacidad de procesamiento?
    - Donde debe ir efectivamente cada bloque (destino)
- **¿Estas preguntas deben responderse en el plan de producción o en la optimización?**

# Selección de envoltente económica como límite de pit final

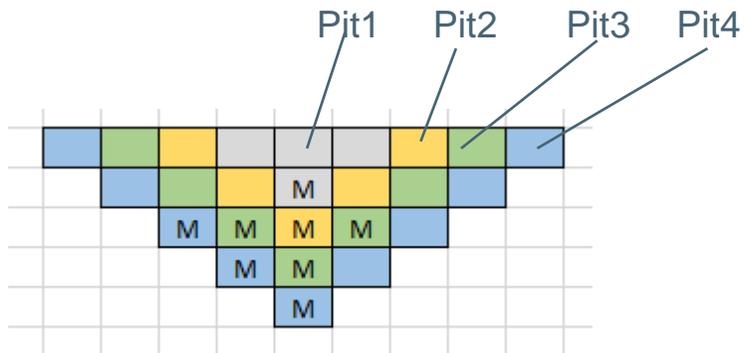
## Heurística para estimar el pit final:

- Best Case: extracción pit a pit
- Worst Case: extracción banco a banco



# Ejemplo: Extracción Banco a Banco

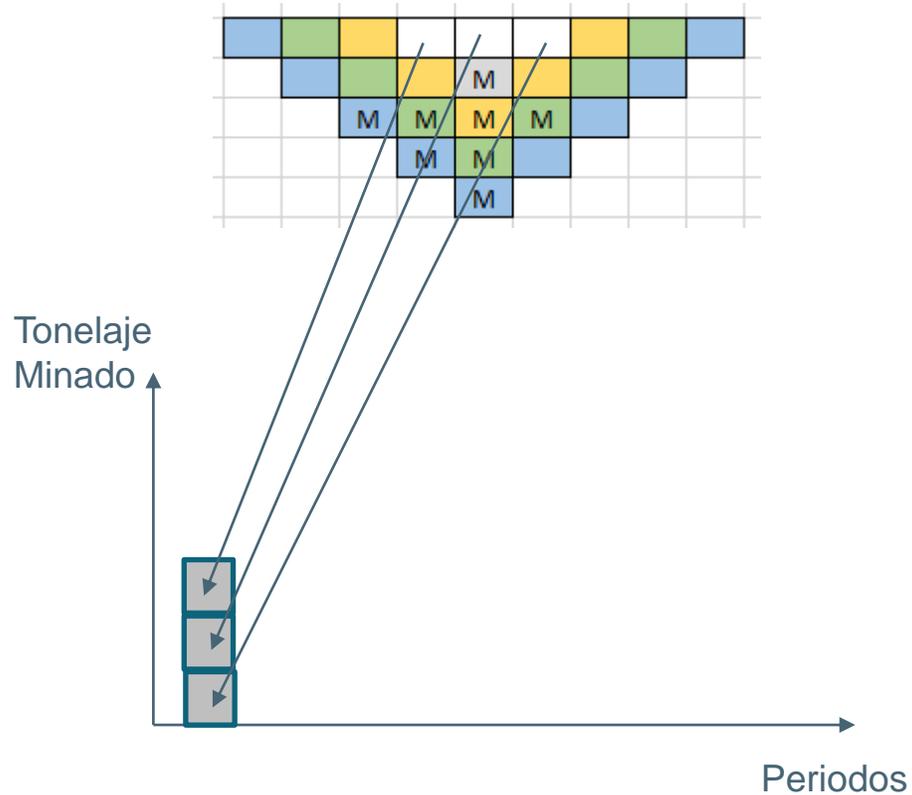
- **Debemos seleccionar un Shell determinado**
  - Para el ejemplo: Pit 4
  - El proceso debe repetirse para todos los shells de manera independiente
- **Debemos suponer una capacidad máxima de minado o de procesamiento:**
  - Para el ejemplo: capacidad de minado, 3 bloques por periodo
- **Como es el caso banco a banco “nos olvidamos” de los pits al interior de nuestro pit seleccionado y comenzamos a minar banco a banco**



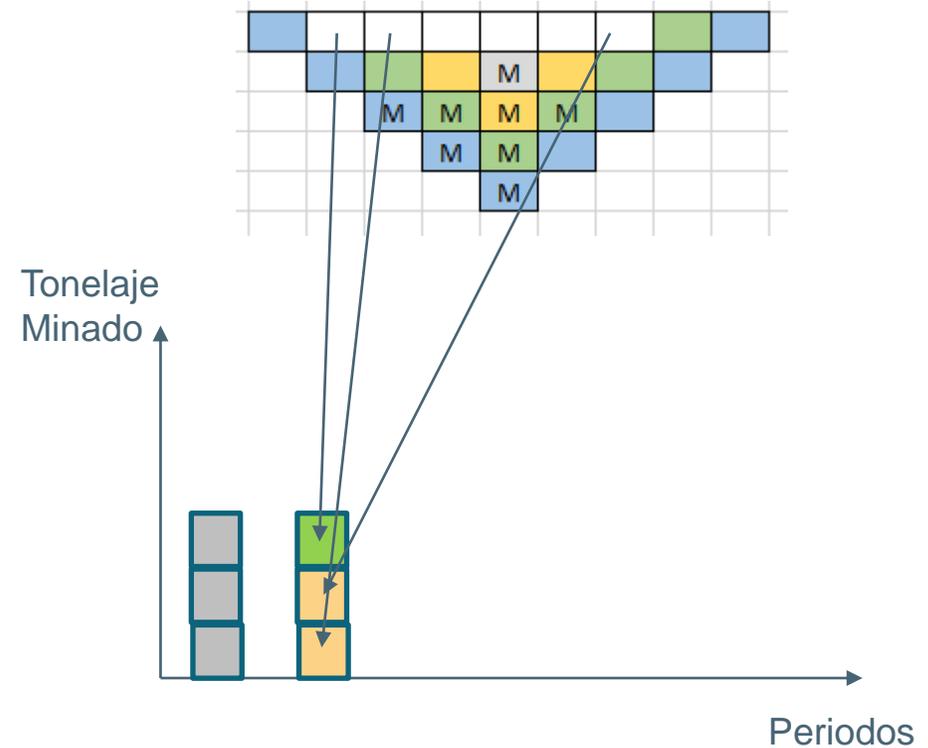
# Ejemplo: Extracción Banco a Banco

Para estos efectos, el orden en que se sacan los bloques de cada banco no es importante (podría serlo si hubiese mineral en los bloques)

## Periodo 1



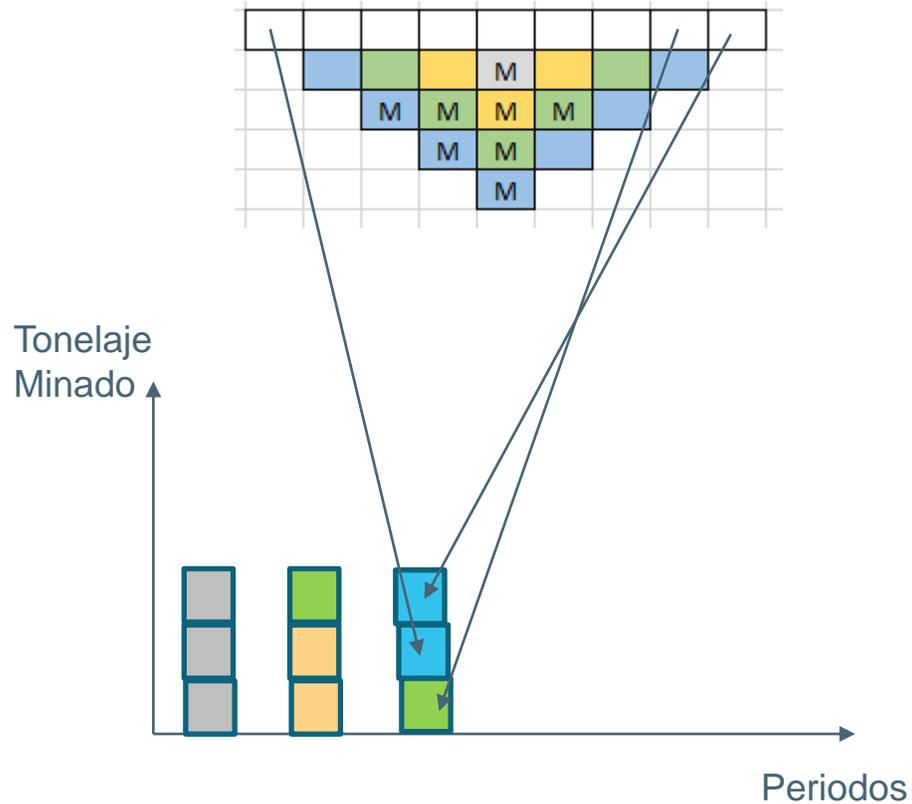
## Periodo 2



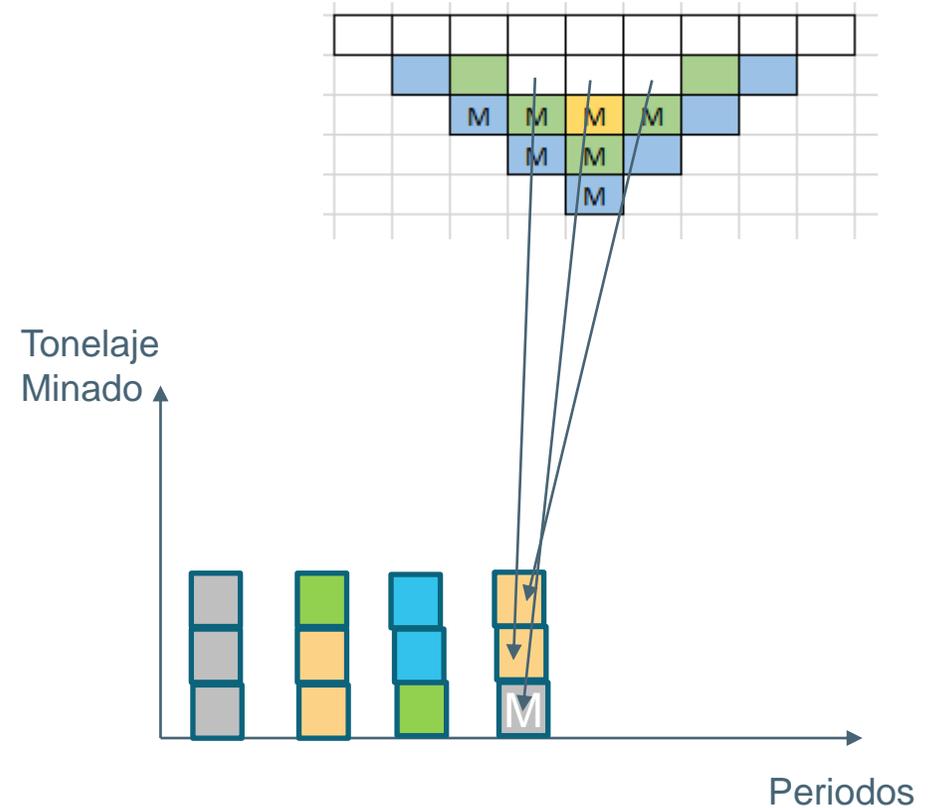
# Ejemplo: Extracción Banco a Banco

Como hay un bloque de mineral, lo sacamos primero, para obtener algún beneficio positivo

## Periodo 3

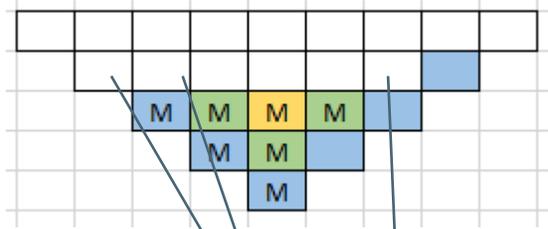


## Periodo 4

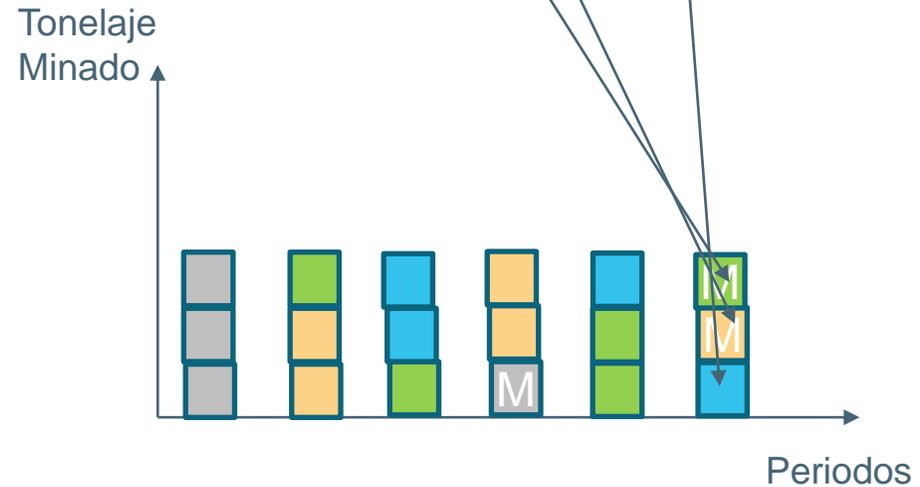
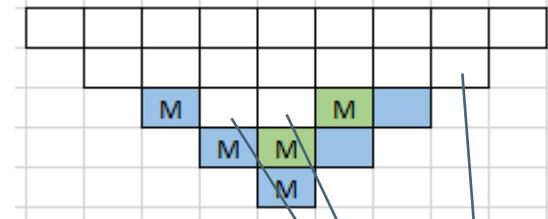


# Ejemplo: Extracción Banco a Banco

**Periodo 5** No podemos sacar el mineral aun, pues debemos terminar un banco para seguir con el otro



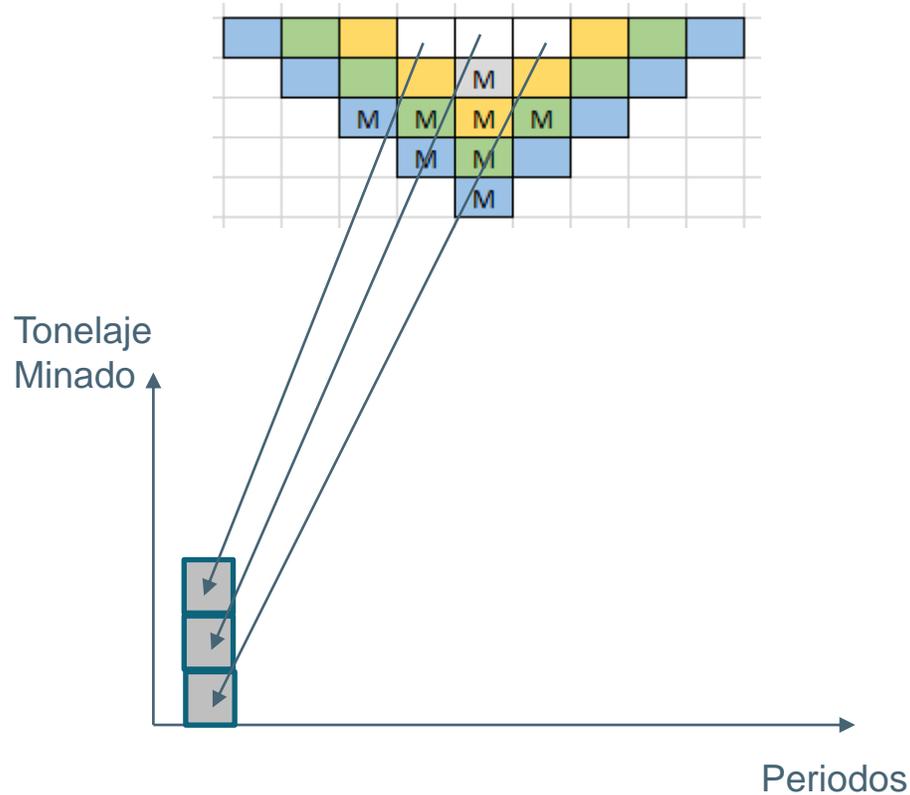
**Periodo 6**



... y seguimos así hasta terminar de minar el pit 4 completamente

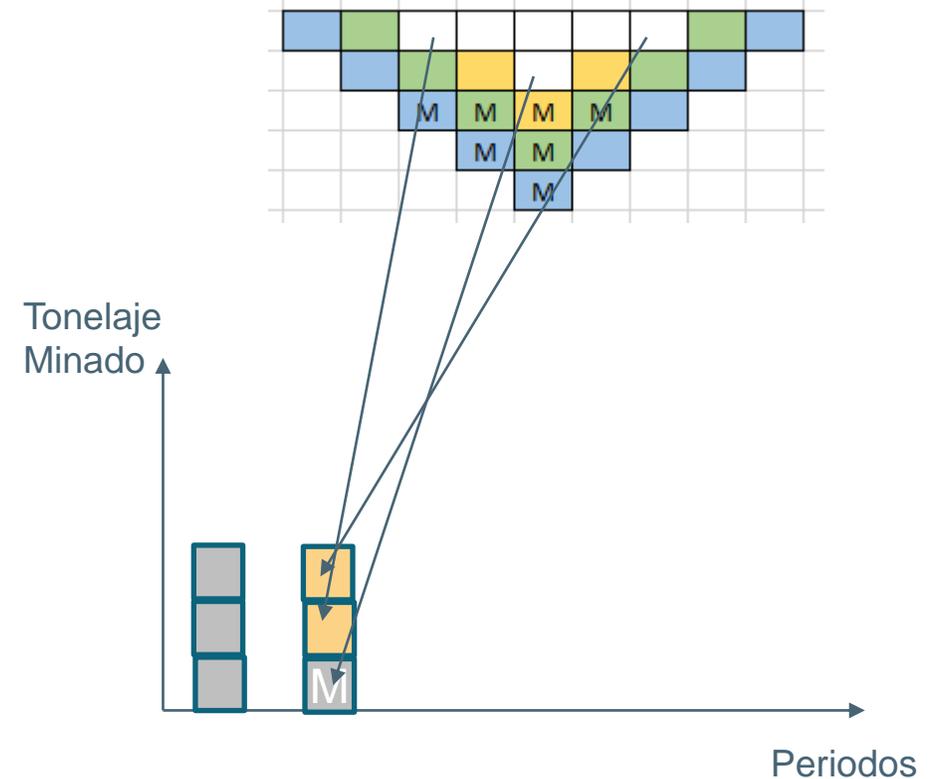
# Ejemplo: Extracción pit a pit

**Periodo 1** Por ahora, todo igual que el caso banco a banco



Pero ahora, en lugar de terminar el primer banco, terminamos de minar el primer pit

**Periodo 2**

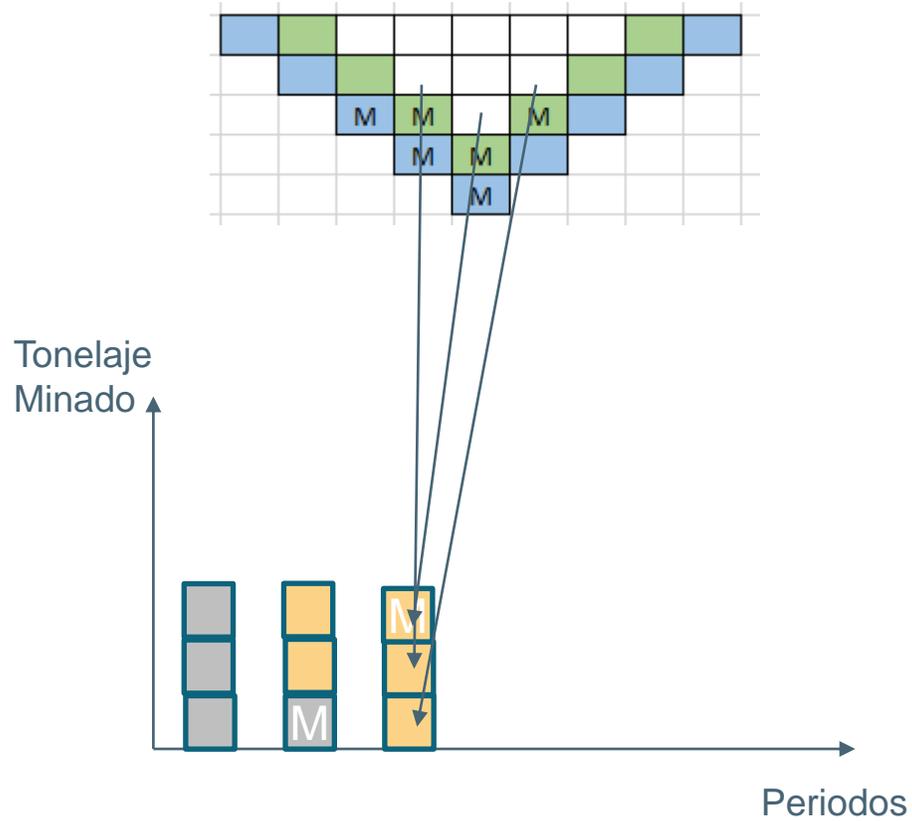


Dentro de un mismo pit debemos respetar los ángulos de talud, por lo que minamos los bancos superiores primero

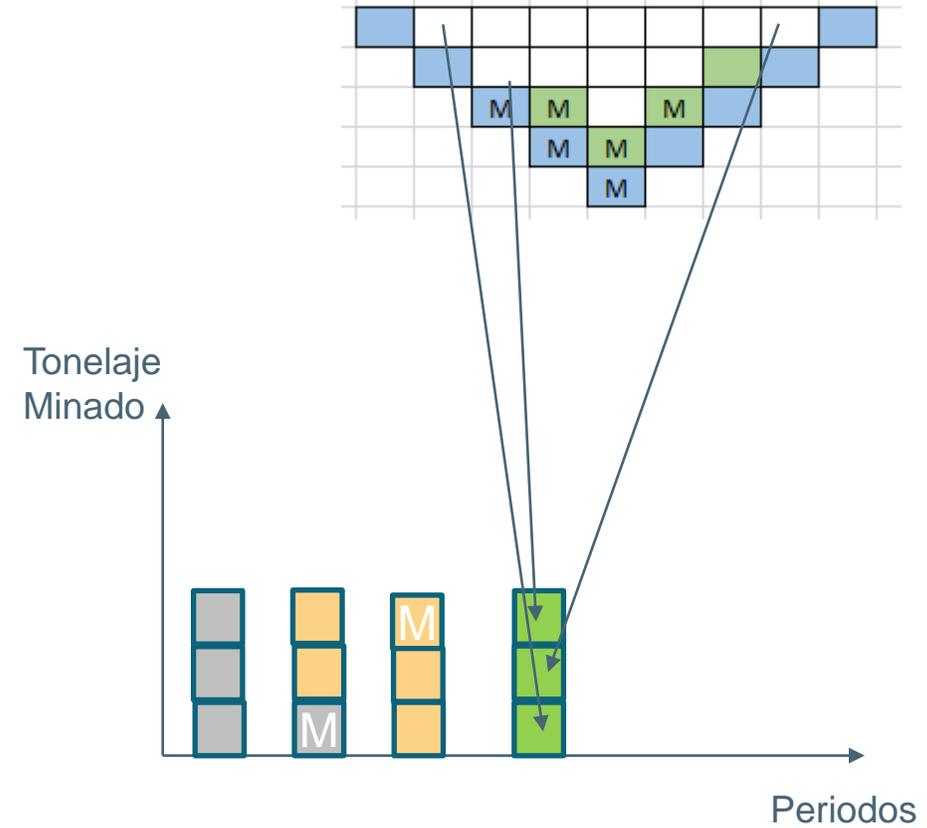
# Ejemplo: Extracción pit a pit

Dentro de un mismo pit debemos respetar los ángulos de talud, por lo que minamos los bancos superiores primero

Periodo 3

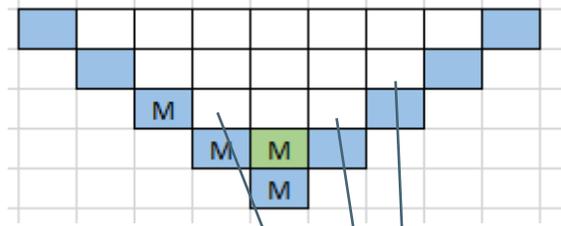


Periodo 4

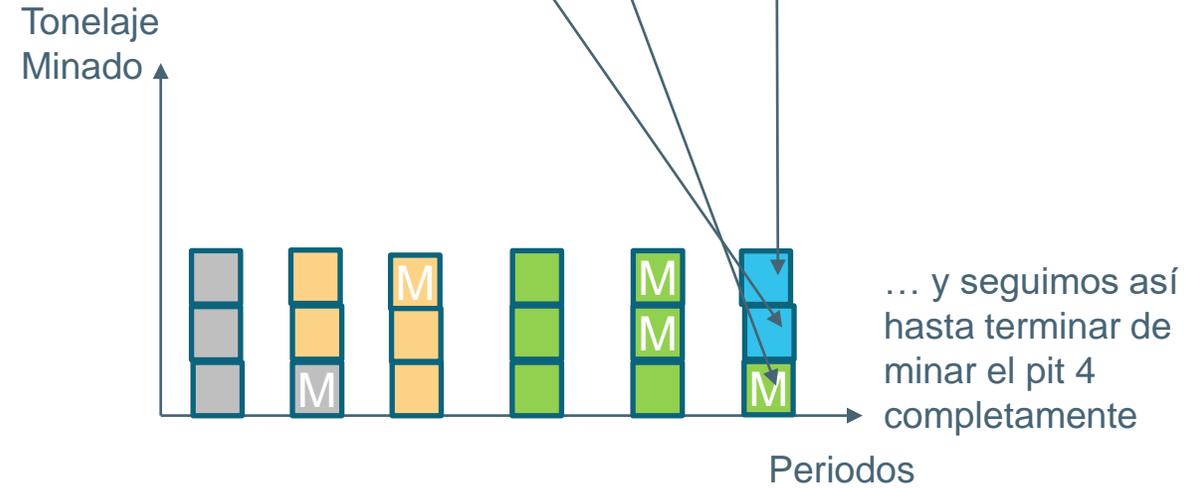
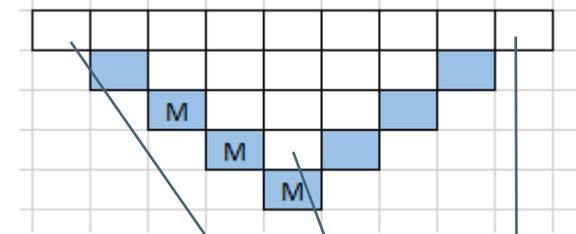


# Ejemplo: Extracción pit a pit

Periodo 5

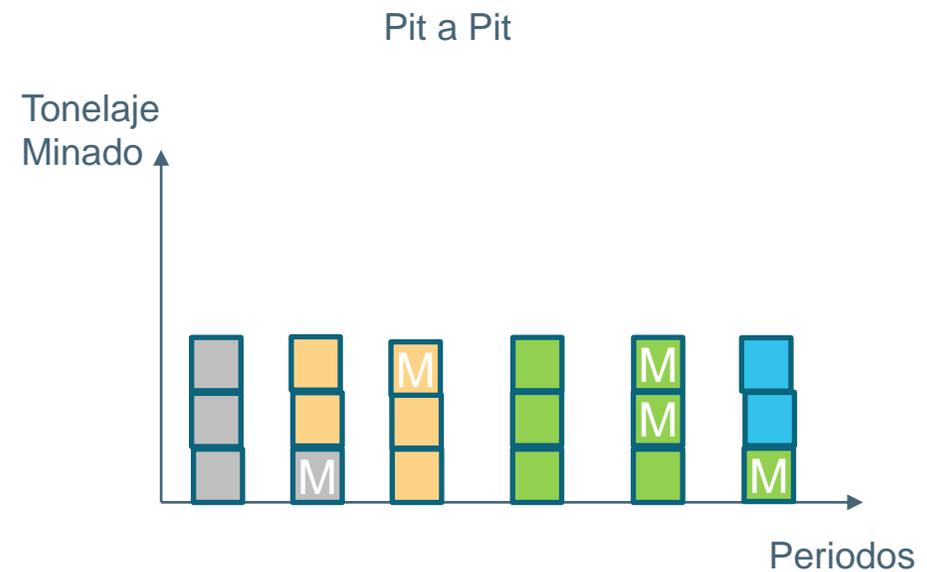


Periodo 6



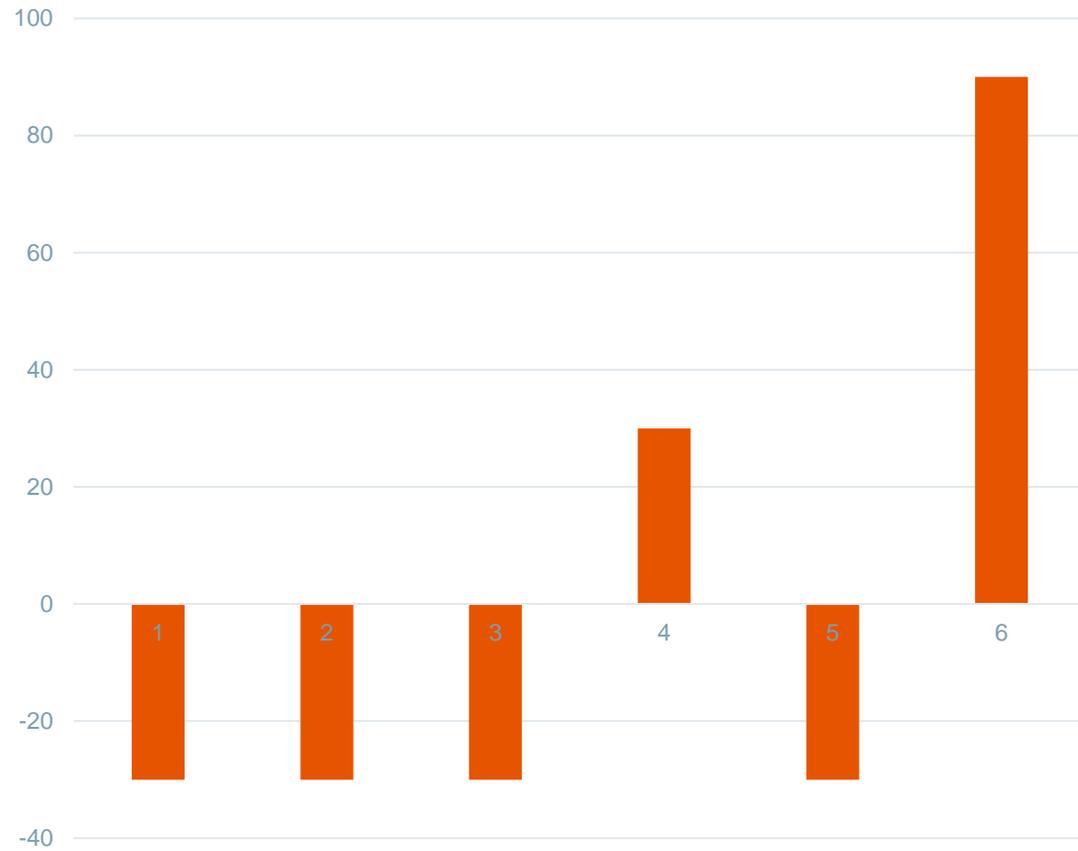
# ¿Y cuál es la diferencia?

- Si tenemos los pits, entonces teníamos los valores de cada bloque, supongamos:
  - Bloque de Lastre: \$-10, Bloque de mineral: \$50
- Podemos calcular los flujos de caja de ambos casos....

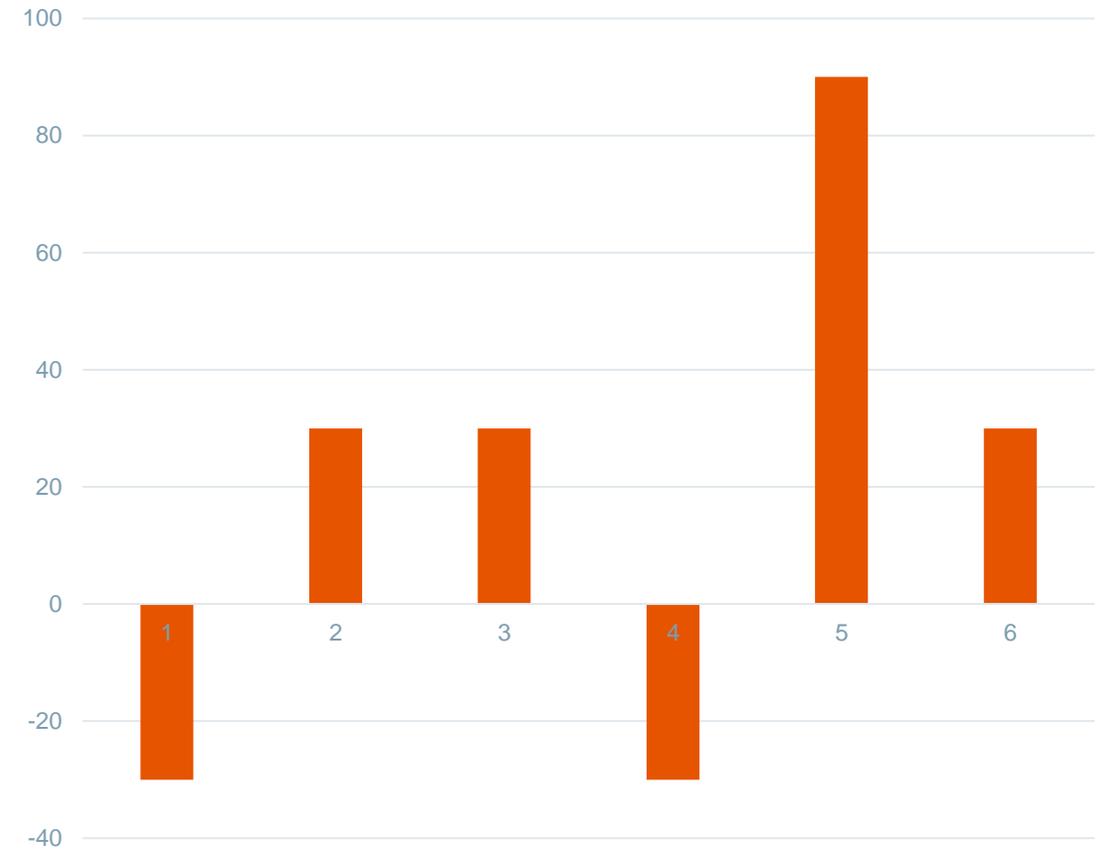


# Flujos de caja

Flujos de caja caso Banco a Banco

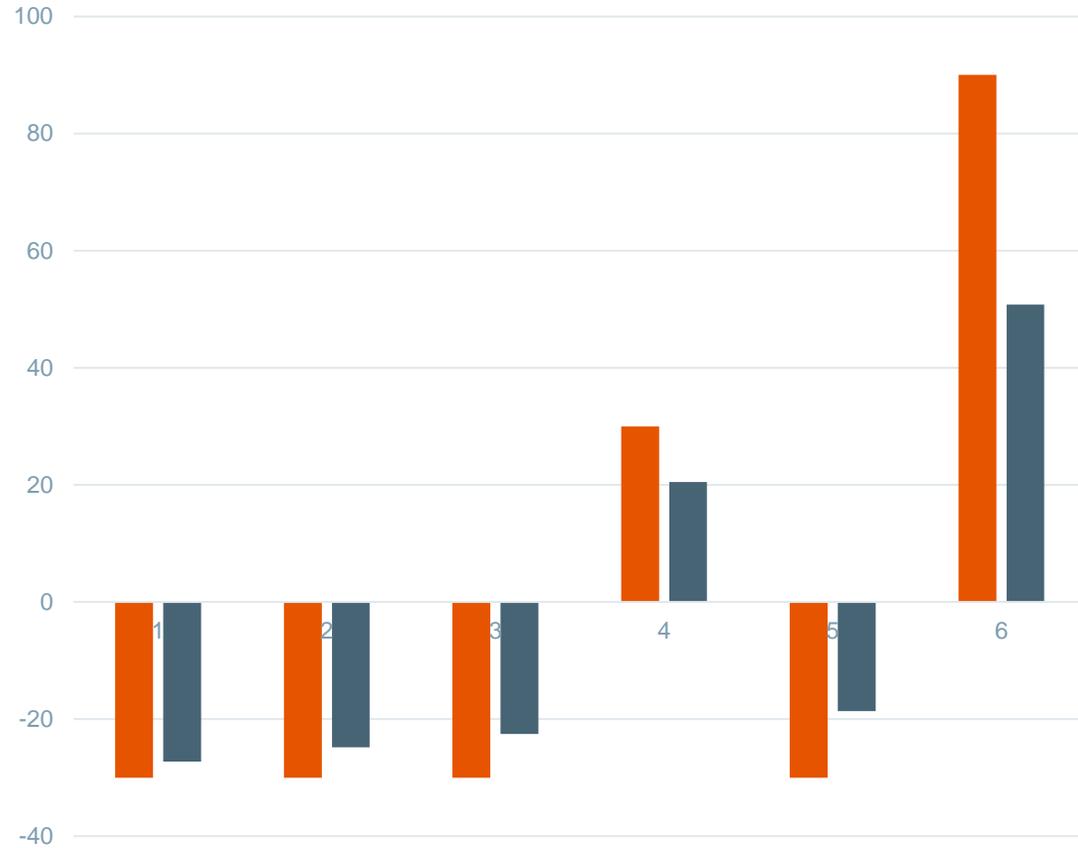


Flujos de caja caso Pit a Pit



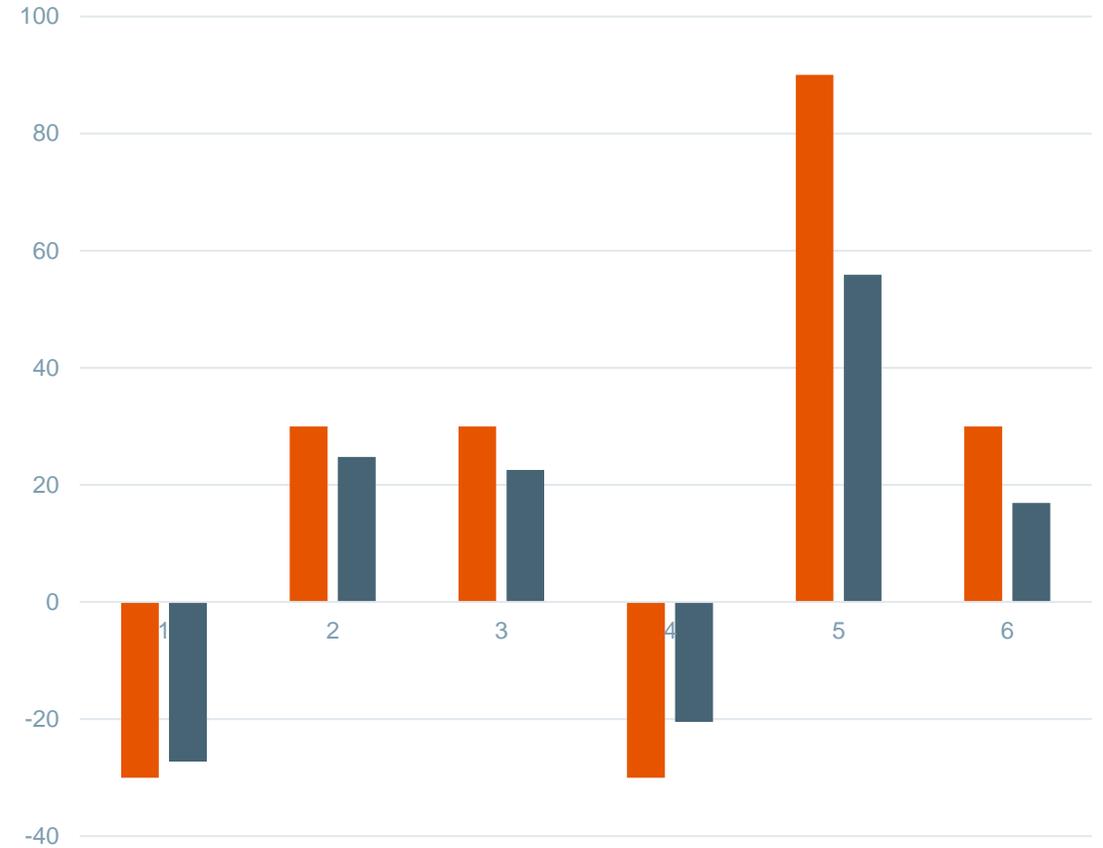
# Flujos de caja Descontados -> VPN (10%)

Flujos de caja descontados caso Banco a Banco (\$)



VPN=\$-22

Flujos de caja descontados caso Pit a Pit (\$)

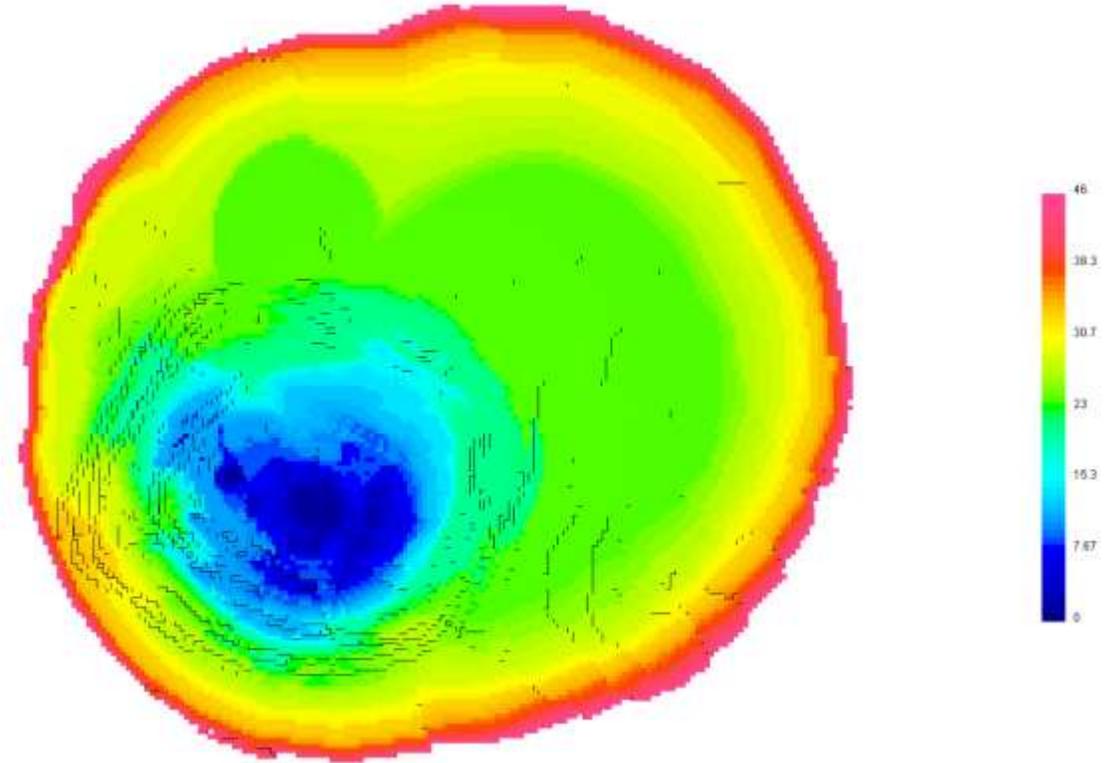
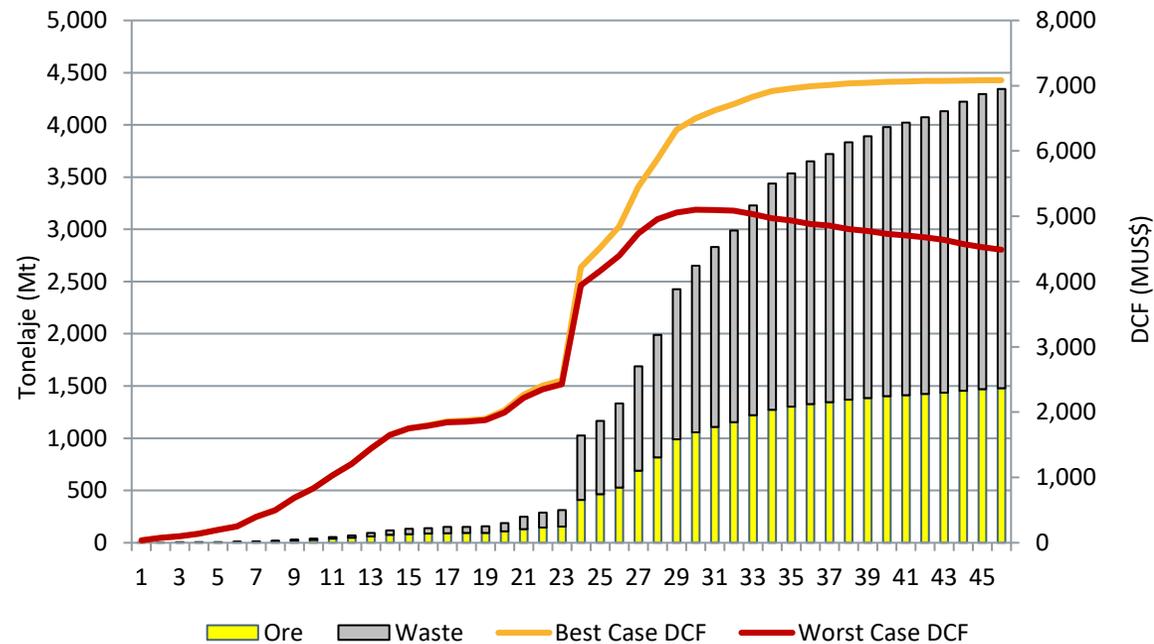


VPN=\$72

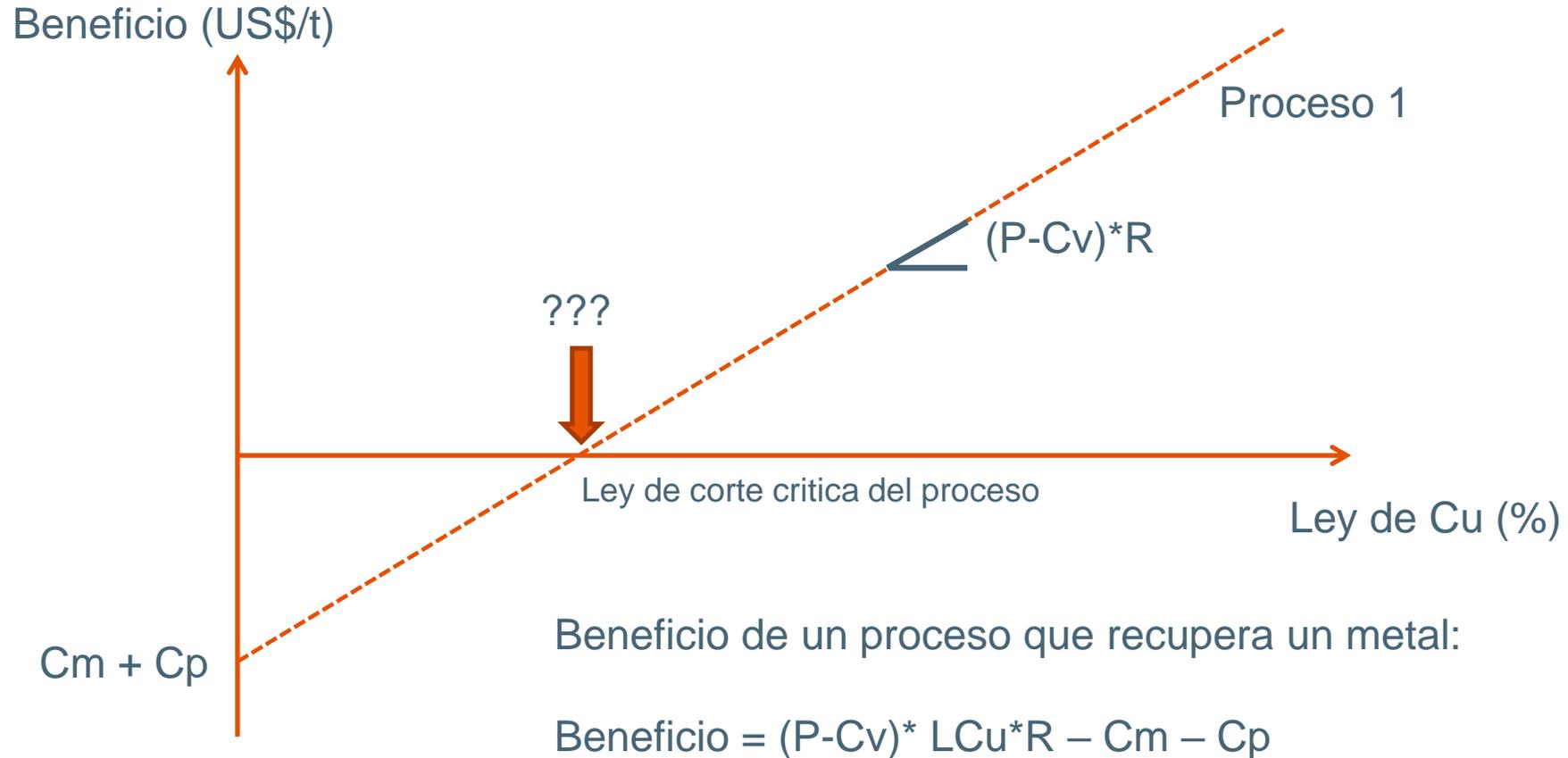
# Selección de envoltente económica como límite de pit final

## Heurística para estimar el pit final:

- Best Case: extracción pit a pit
- Worst Case: extracción banco a banco

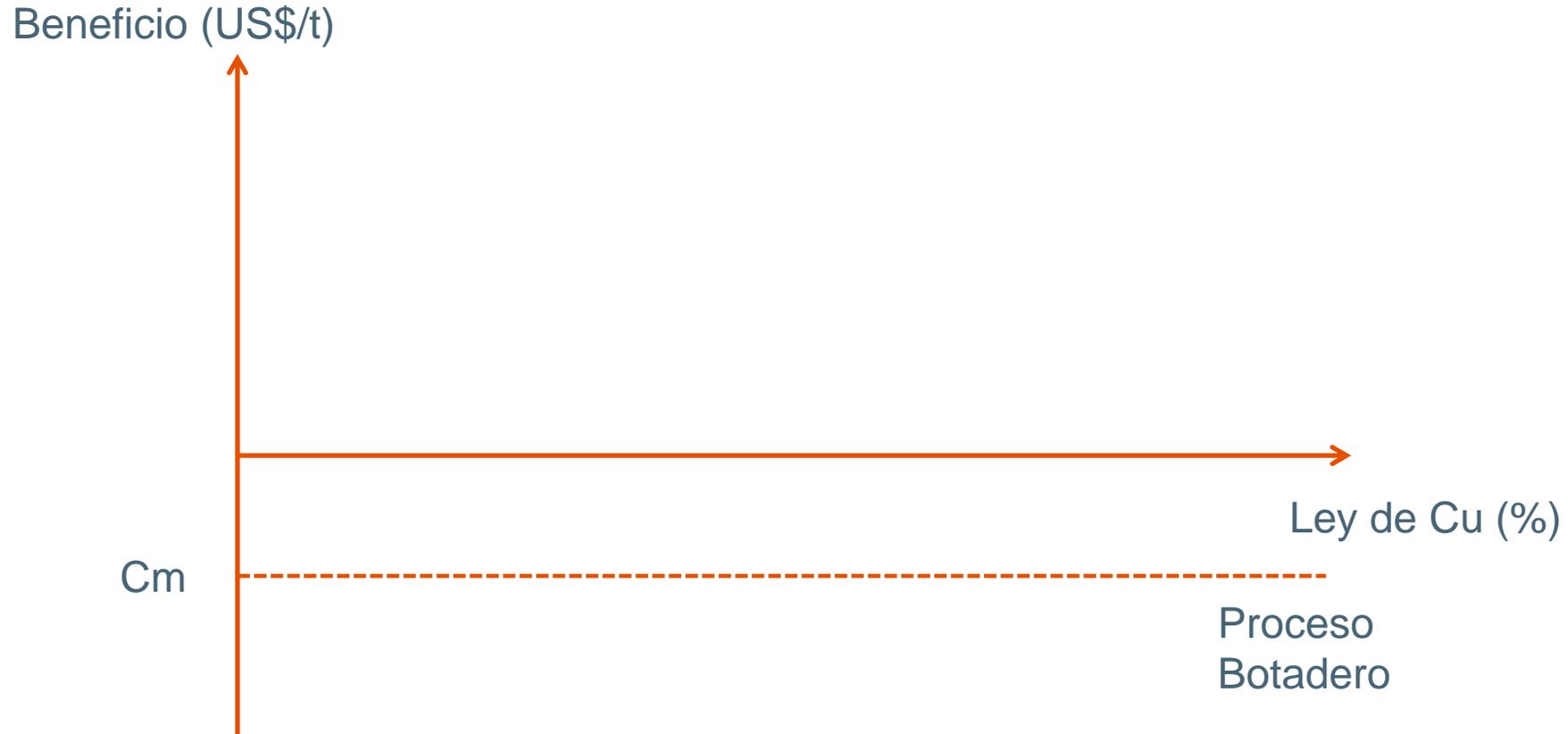


# Valorización de Bloques



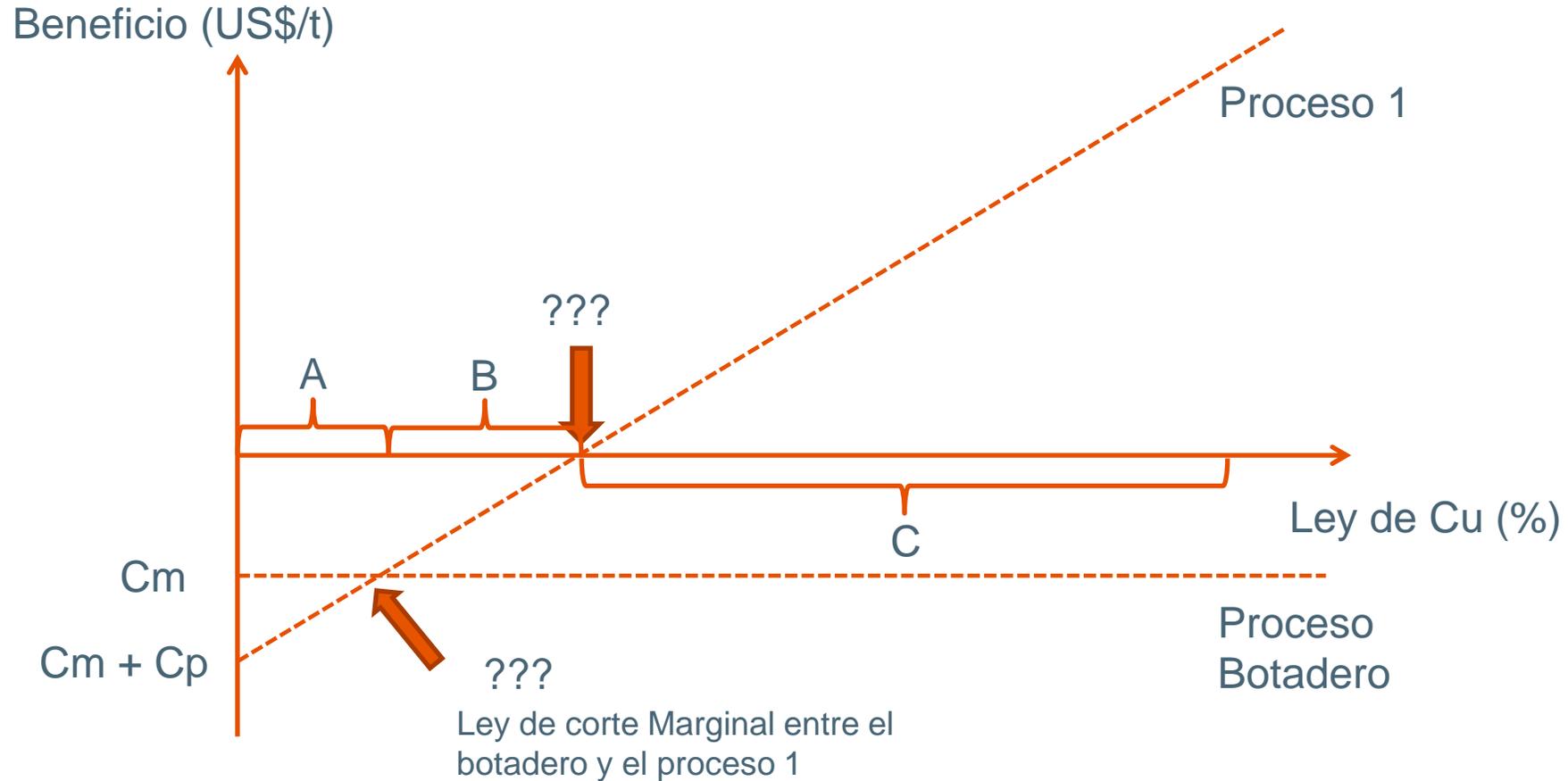
# Valorización de Bloques

En una mina a cielo abierto, existen más destinos disponibles que el proceso de beneficio



Beneficio de un “proceso” que no recupera metales (Botadero)

# Valorización de Bloques / Rajo



¿Cuáles son los destinos de los materiales A, B y C?

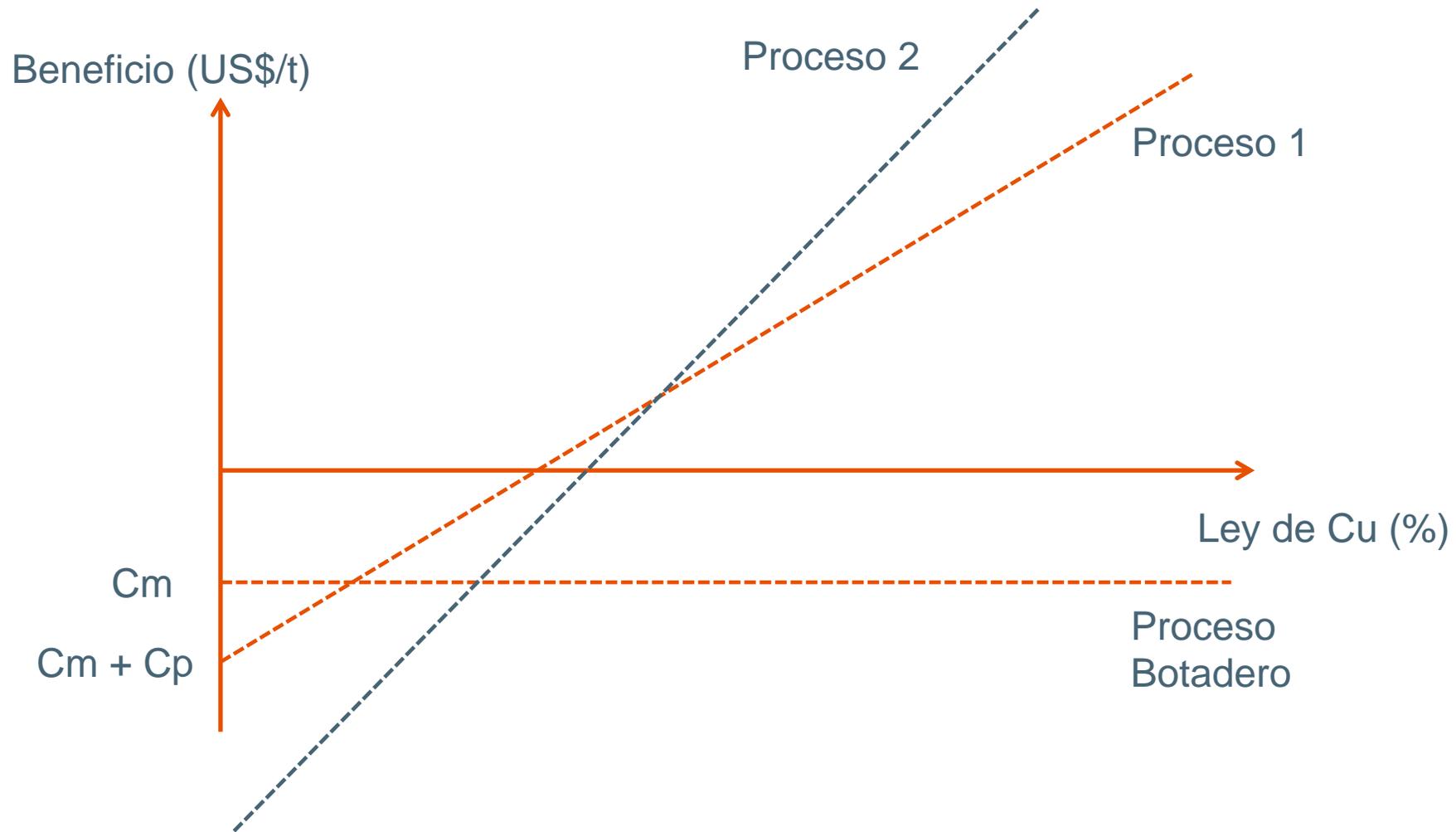


**fcfm**

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

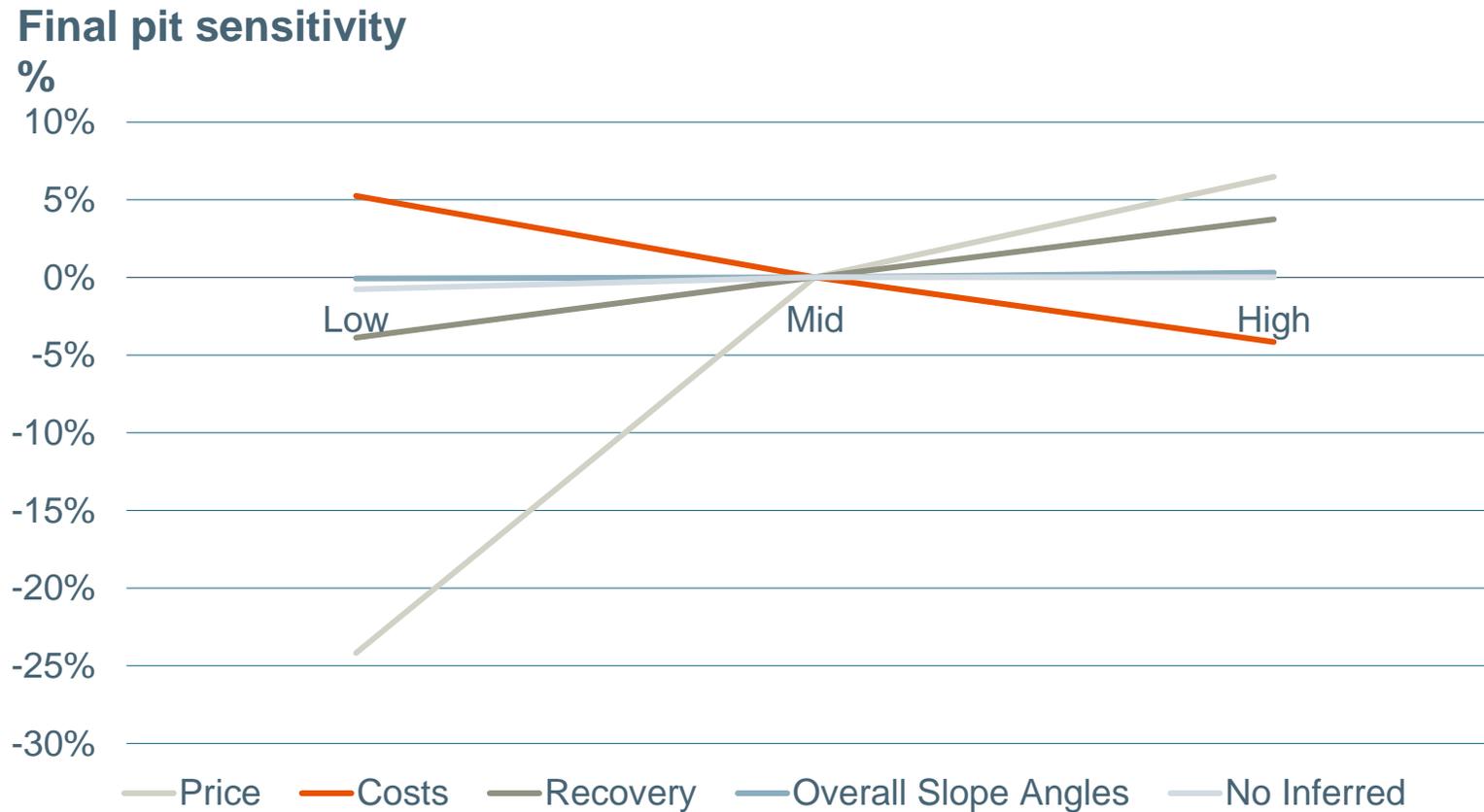
# Valorización de Bloques

Incluso puede diferenciarse el material para ser alimentado a diferentes plantas de proceso



# ¿Qué tan sensible es el pit seleccionado a los parámetros que lo definen?

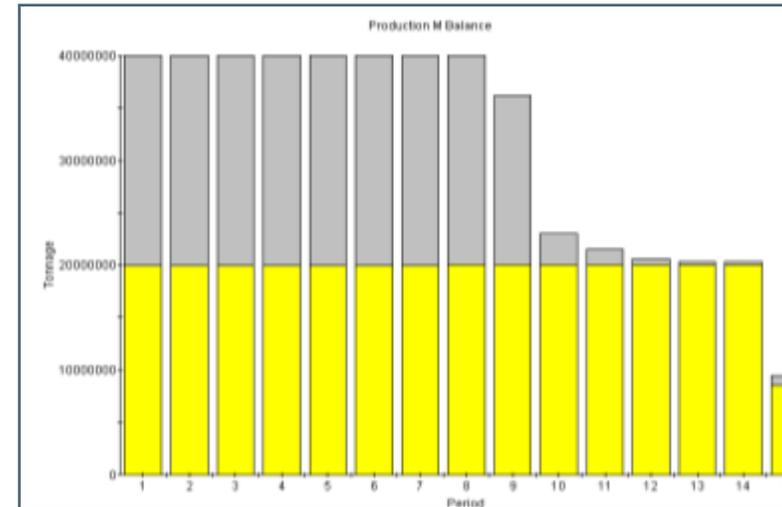
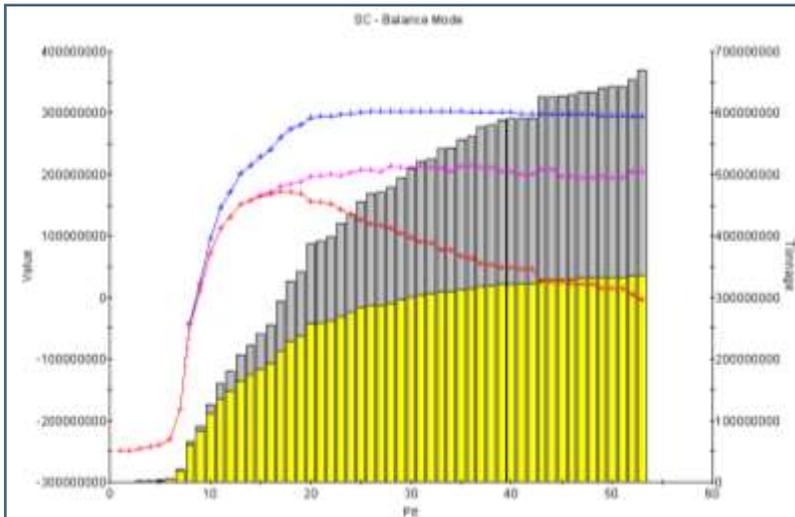
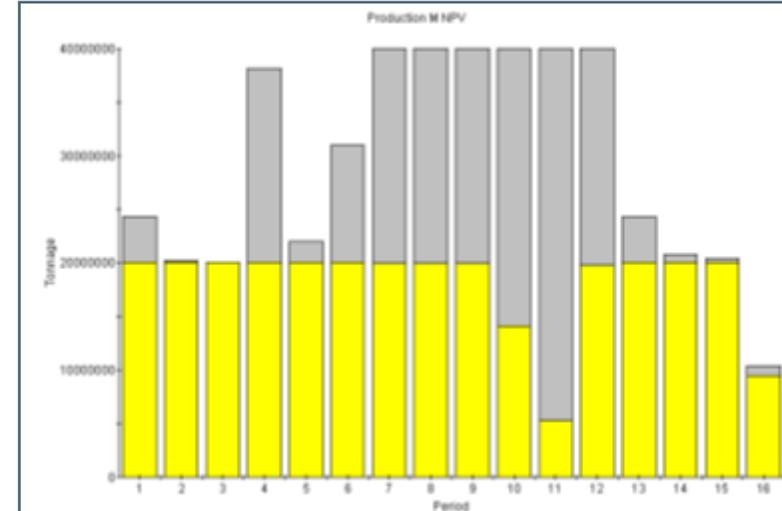
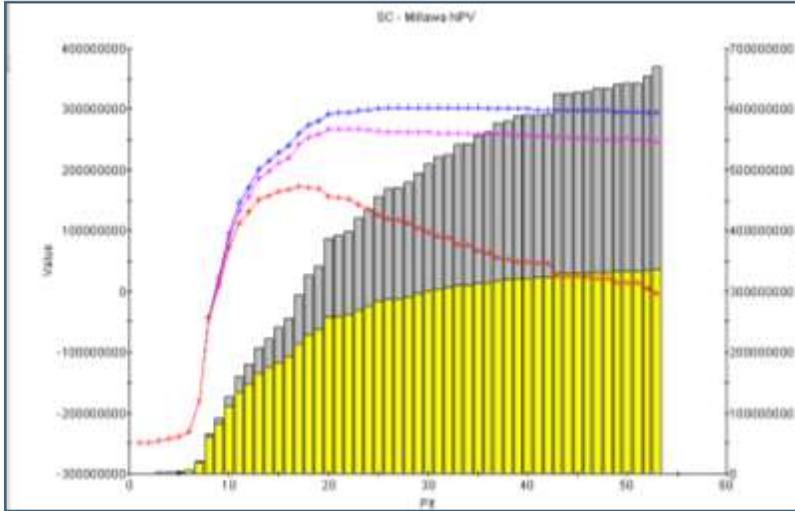
## Spider Graph



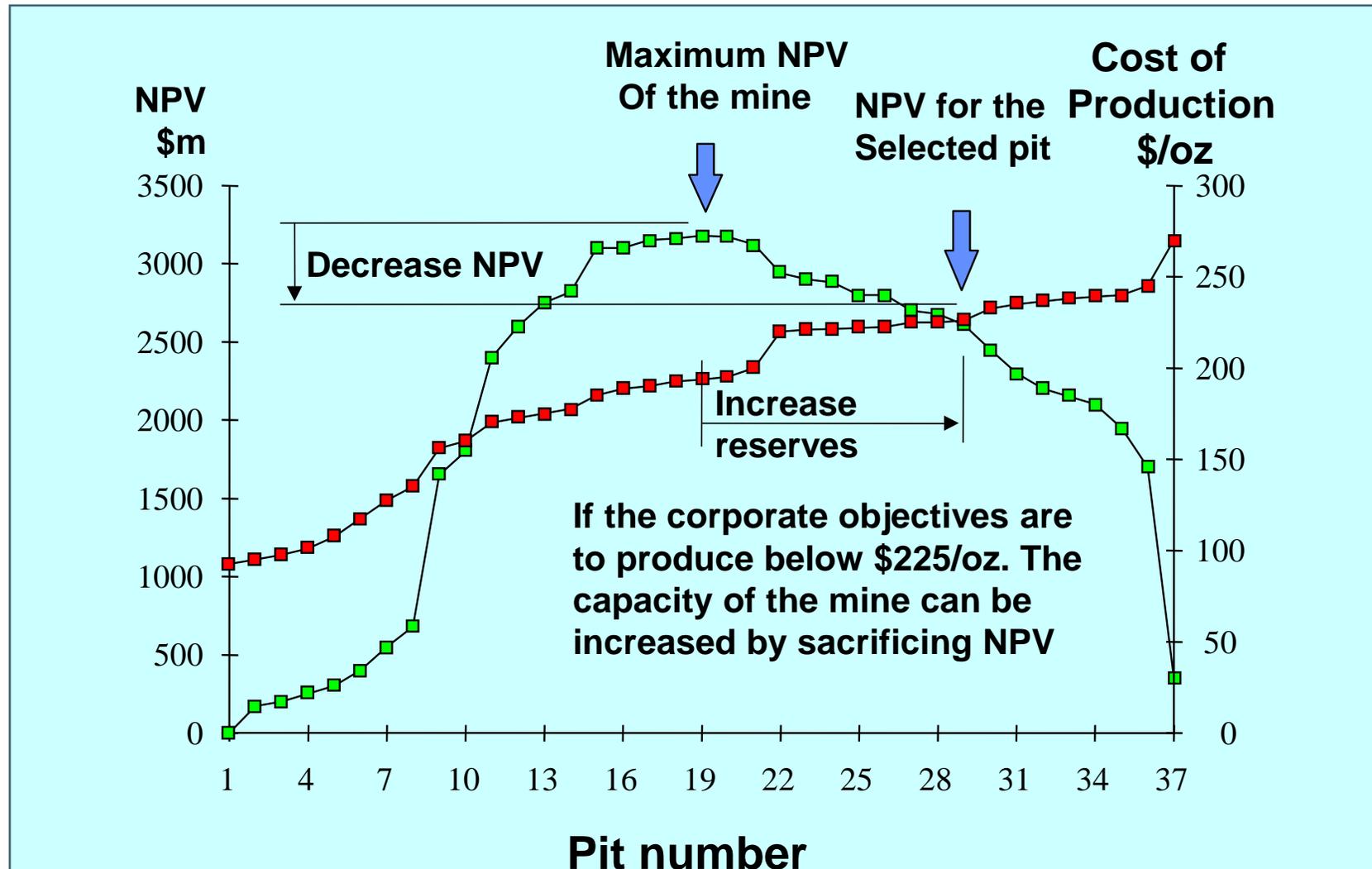
# Planes Mina preliminares

- **La mina no se extrae “pit a pit” - ¿Por qué?**
- **Selección de pushbacks intermedios**
  - Valor
  - Anchos operativos
- **Algoritmo de planificación para generar planes mineros en función de pushbacks**

# Milawa NPV vs Balance Mode



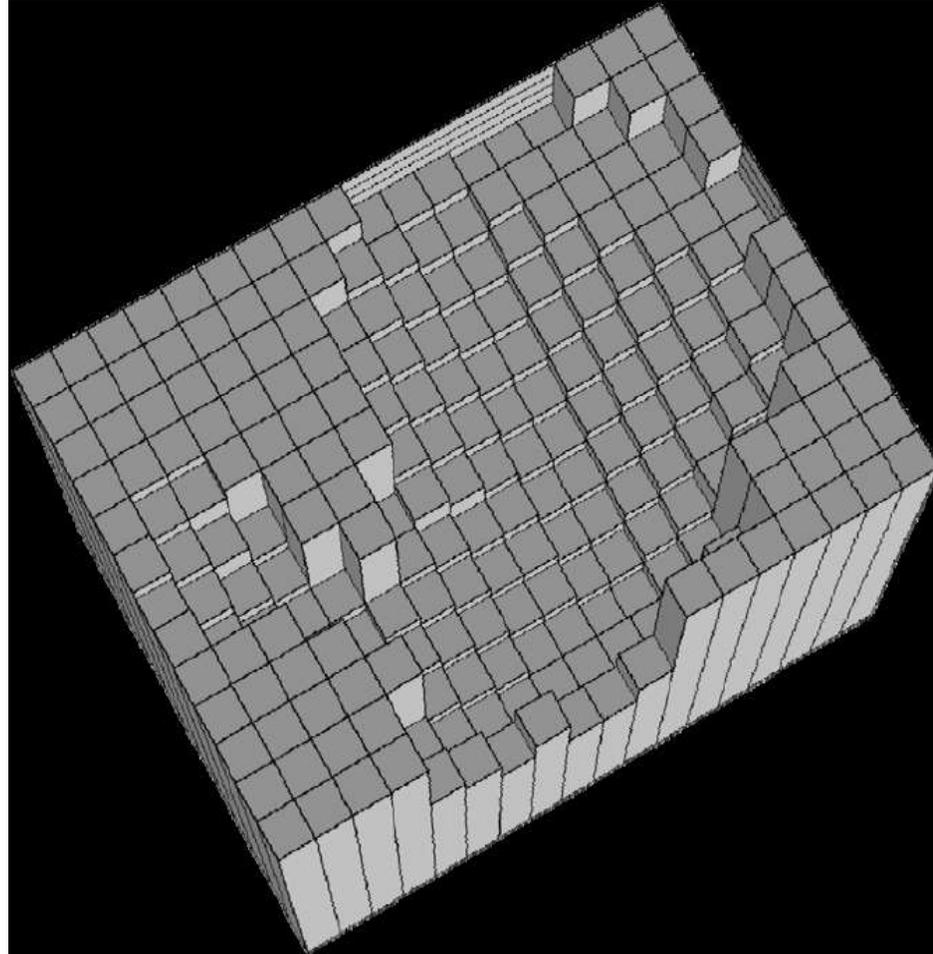
# No Siempre el Punto de Máximo VAN es el Pit Final



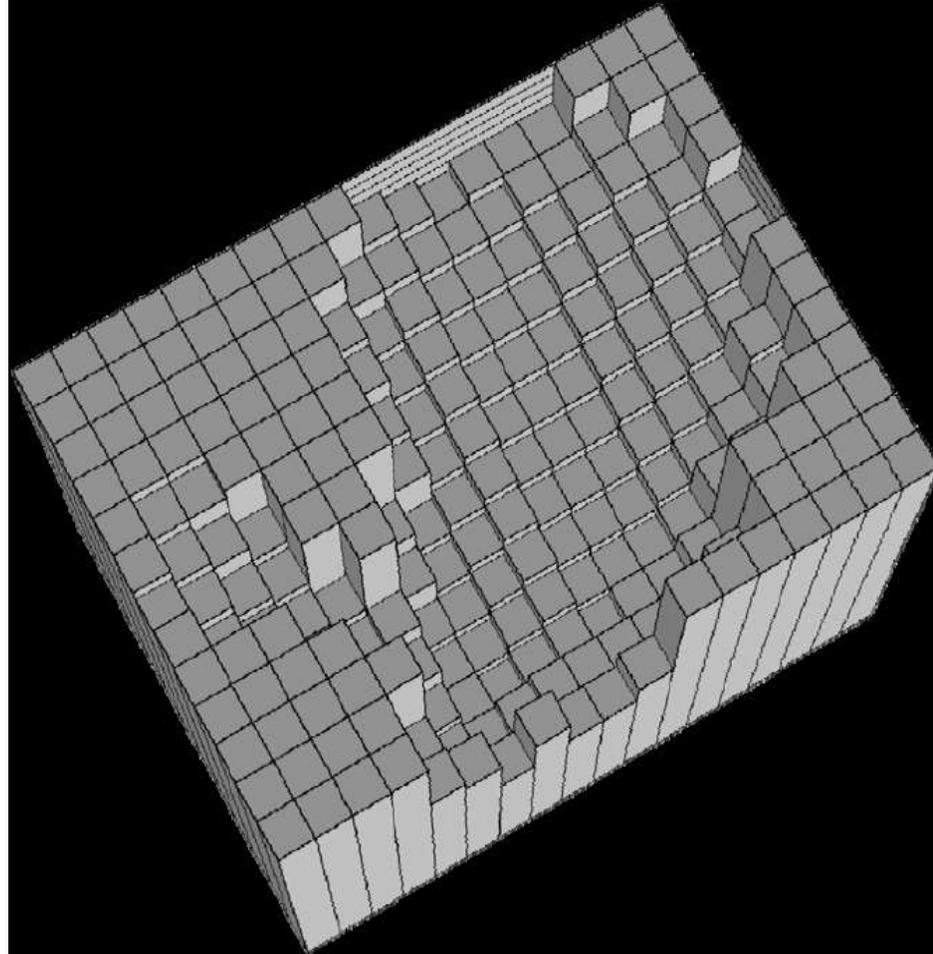
# Optimización matemática con restricciones

- **Principales métodos matemáticos**
  - Programación Lineal + heurísticas
  - Metaheurísticas
- **Resultados:**
  - Bloques extraídos por periodo.
  - Asignación de destino.
  - Otros:
    - Periodos para realizar expansiones de mina o capacidad de proceso
    - Perfil de leyes de corte por periodos
    - Etc.

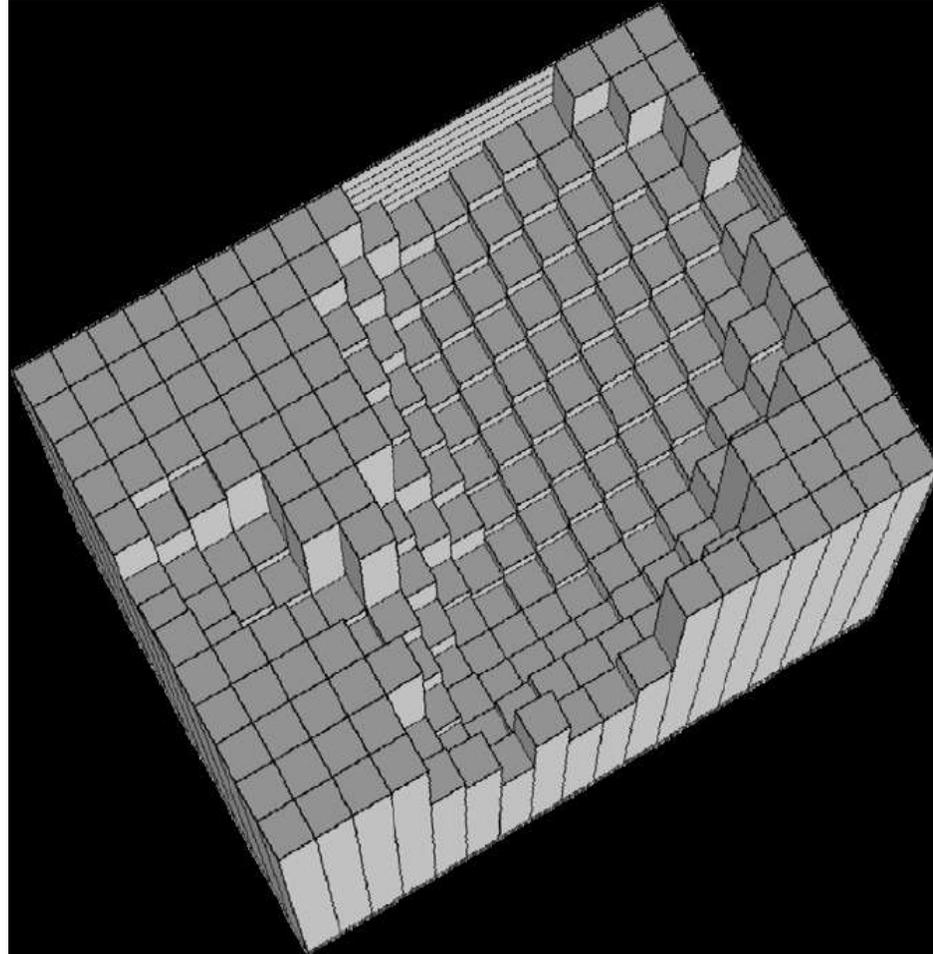
# Periodo 1 (Gaupp 2008, 1000 bloques)



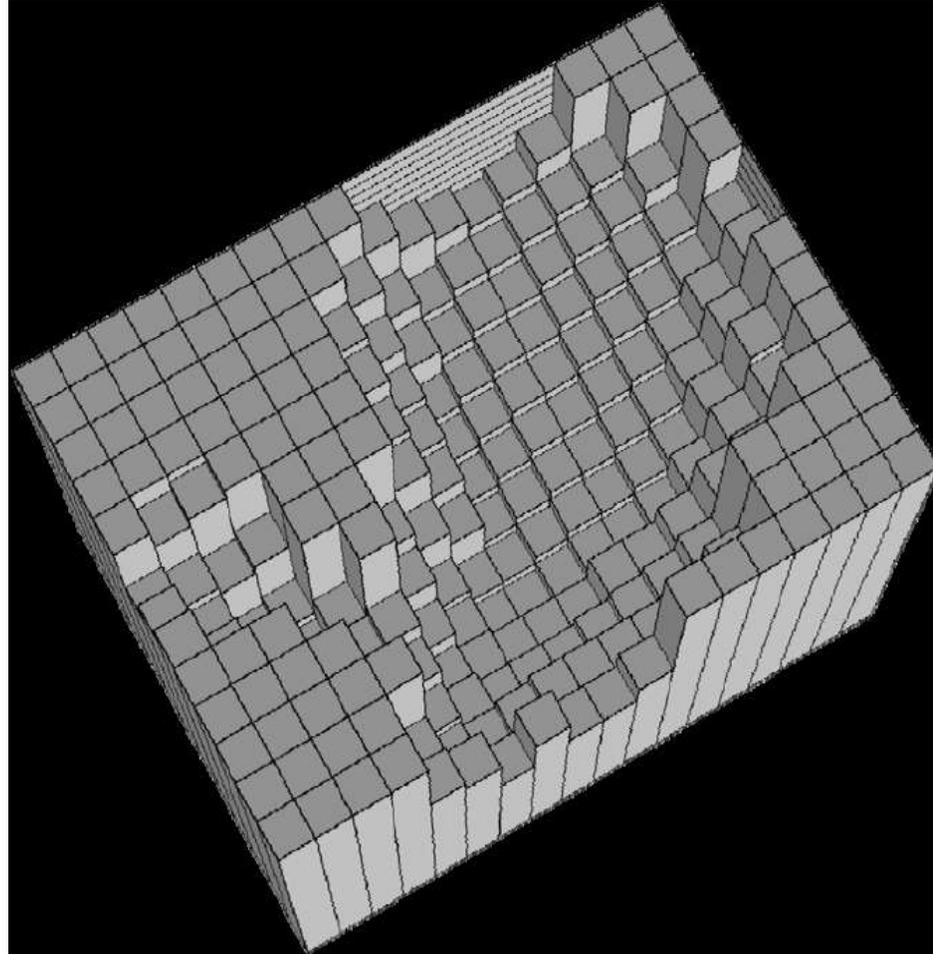
# Periodo 2



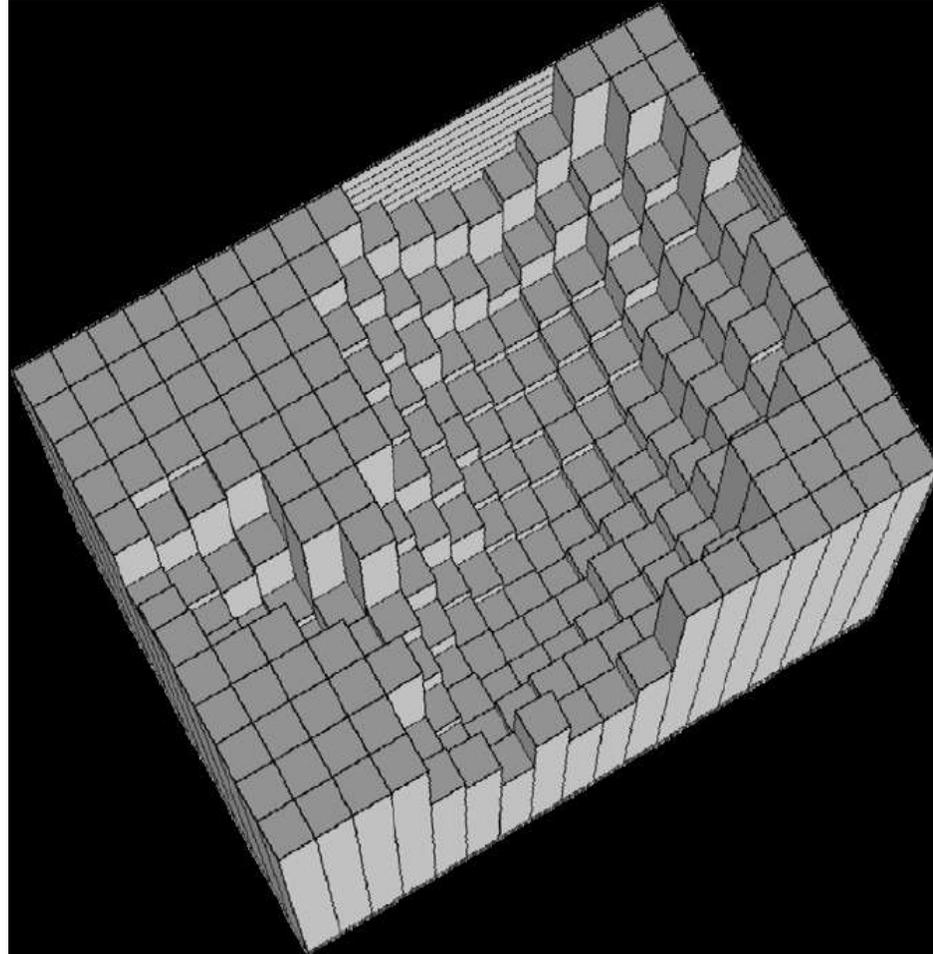
# Periodo 3



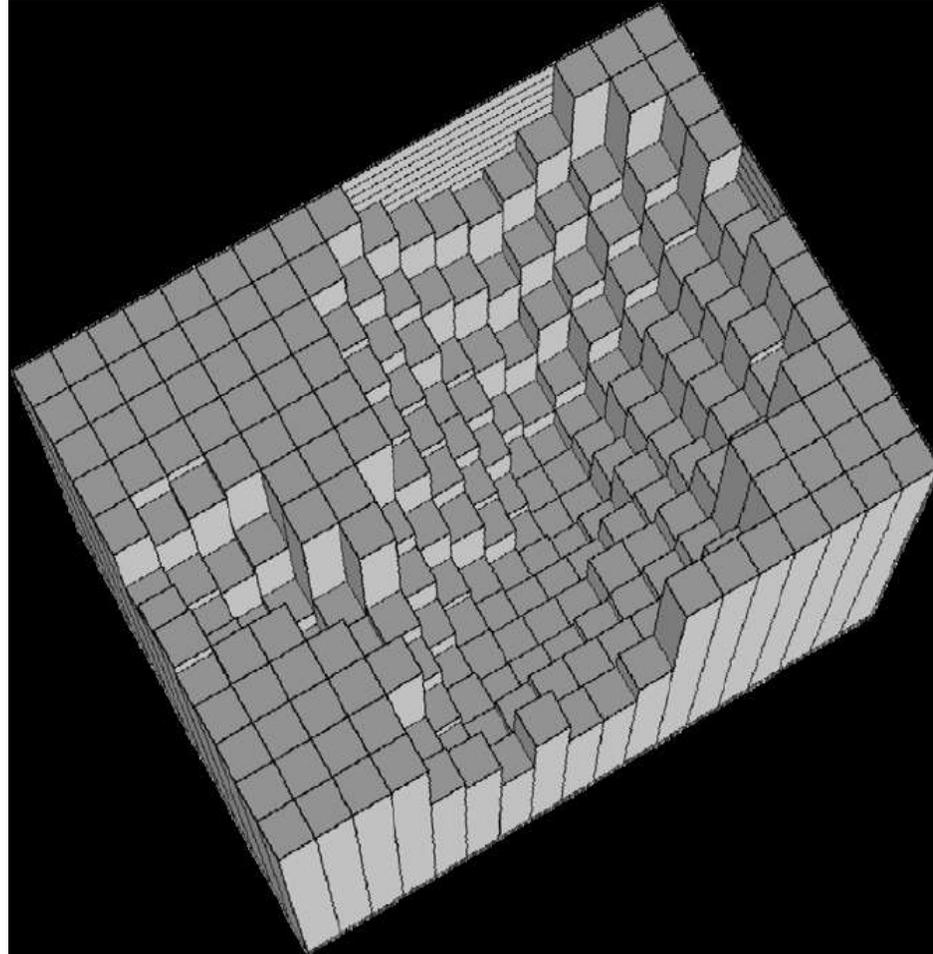
# Periodo 4



# Periodo 5

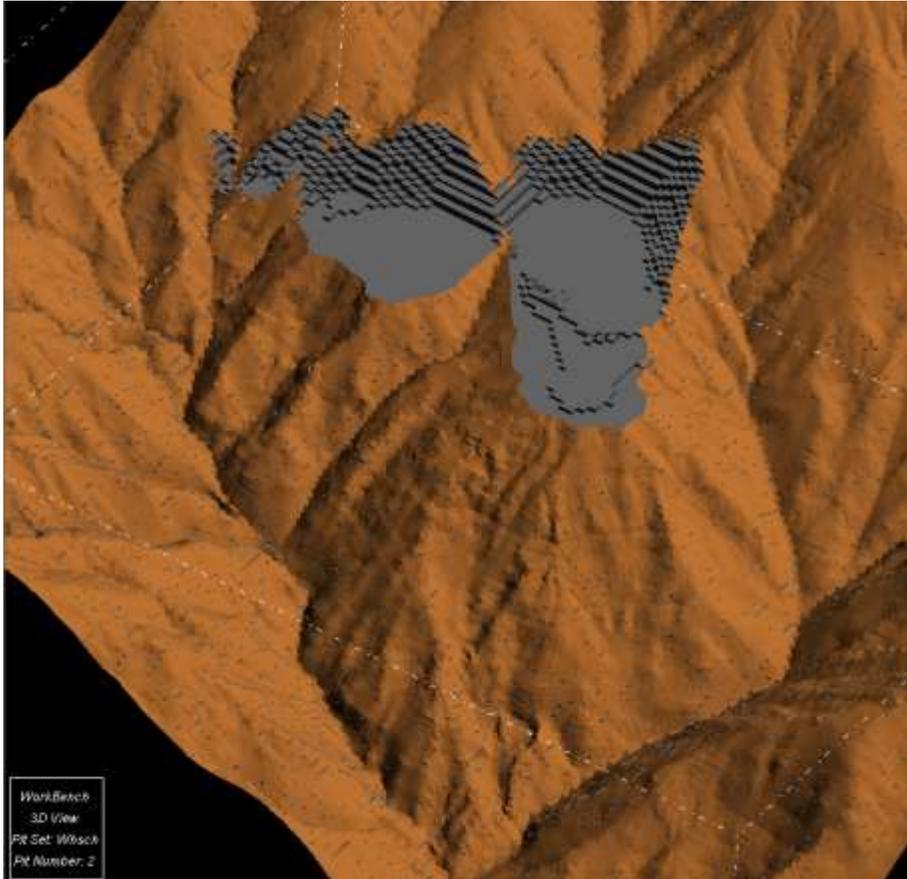


# Periodo 6

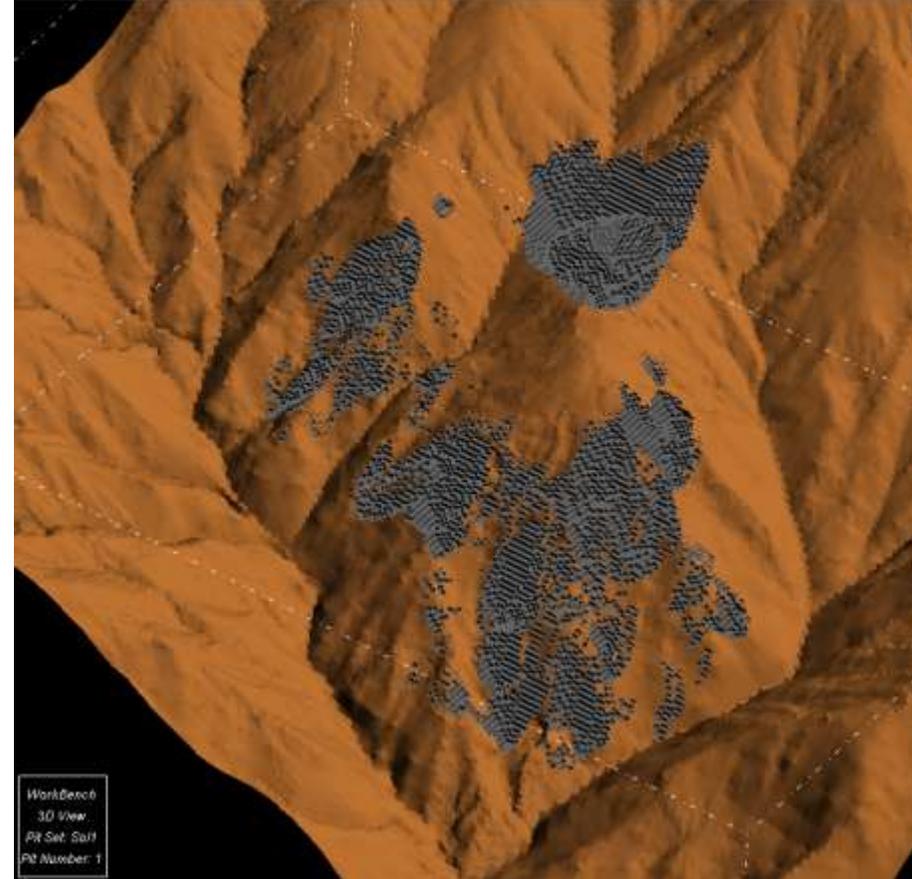


# Fin año 1

## Whittle Mine Schedule

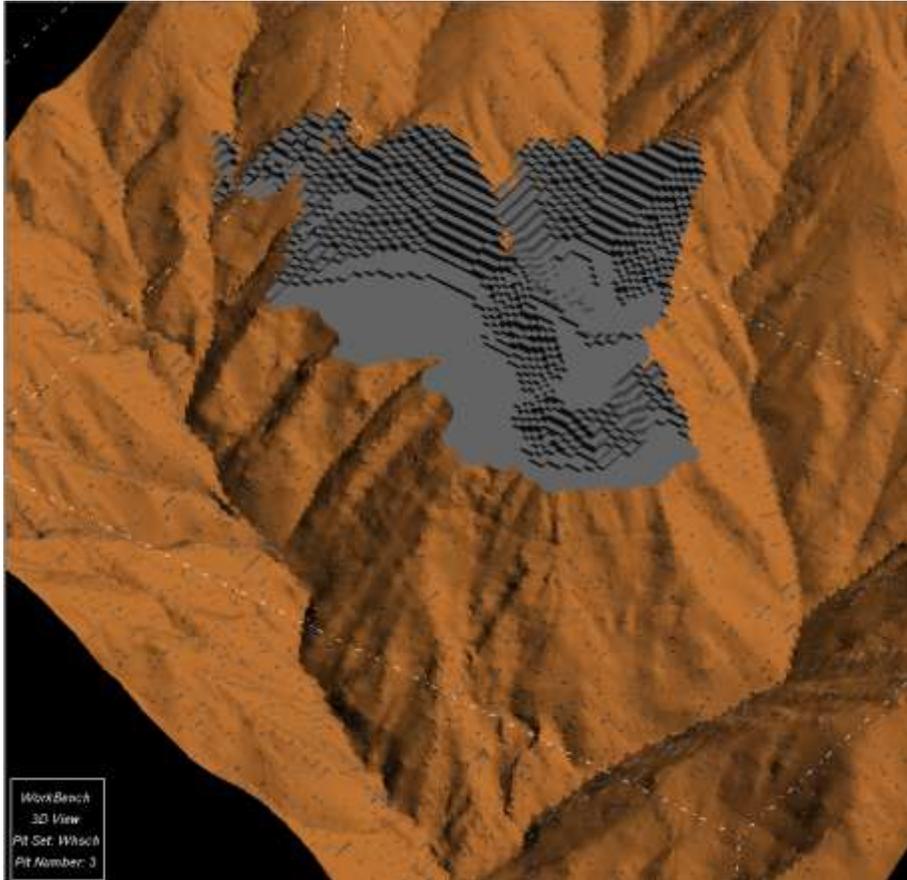


## Agendamiento de bloques

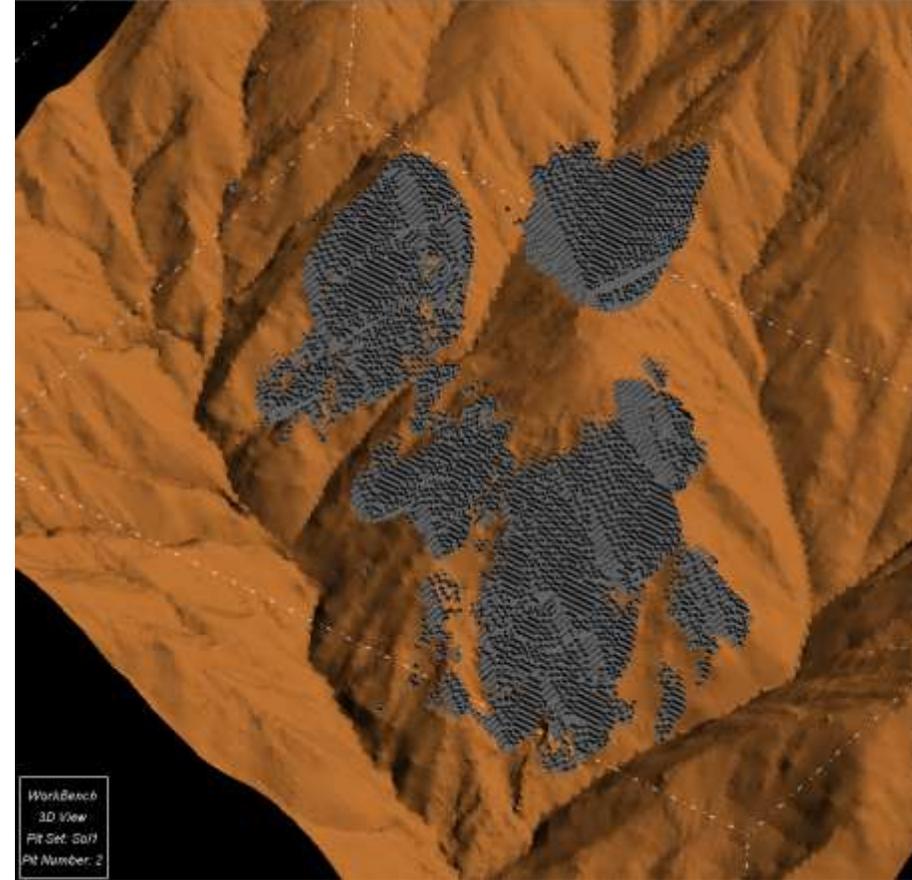


# Fin año 2

## Whittle Mine Schedule

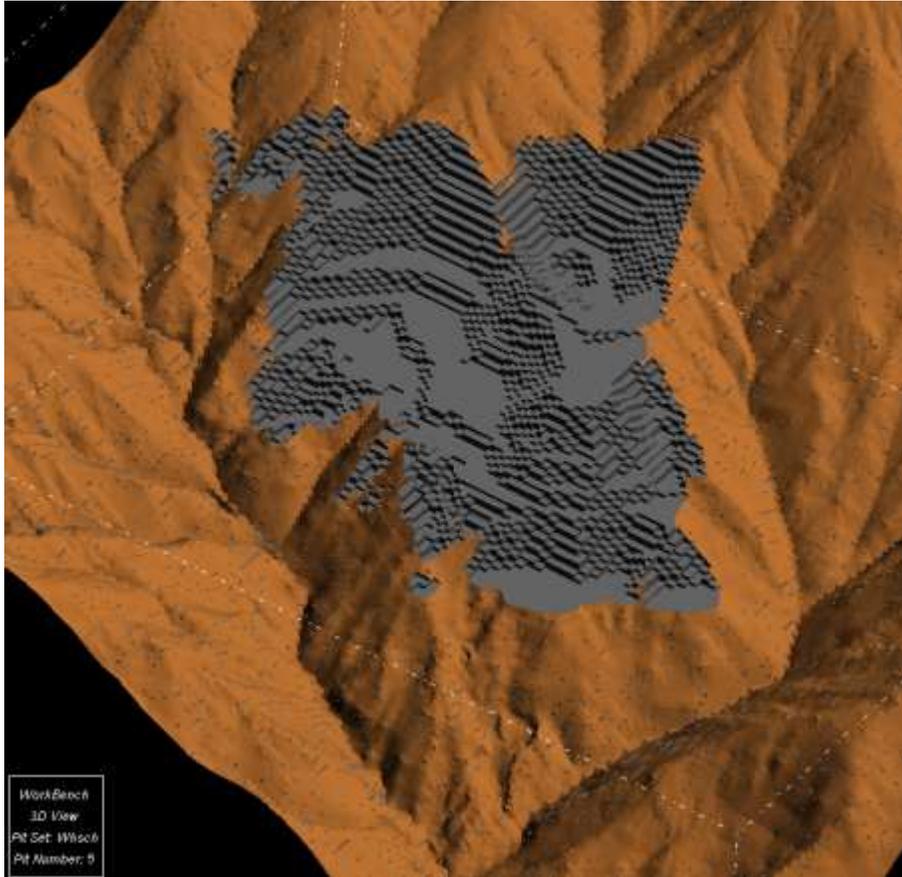


## Agendamiento de bloques

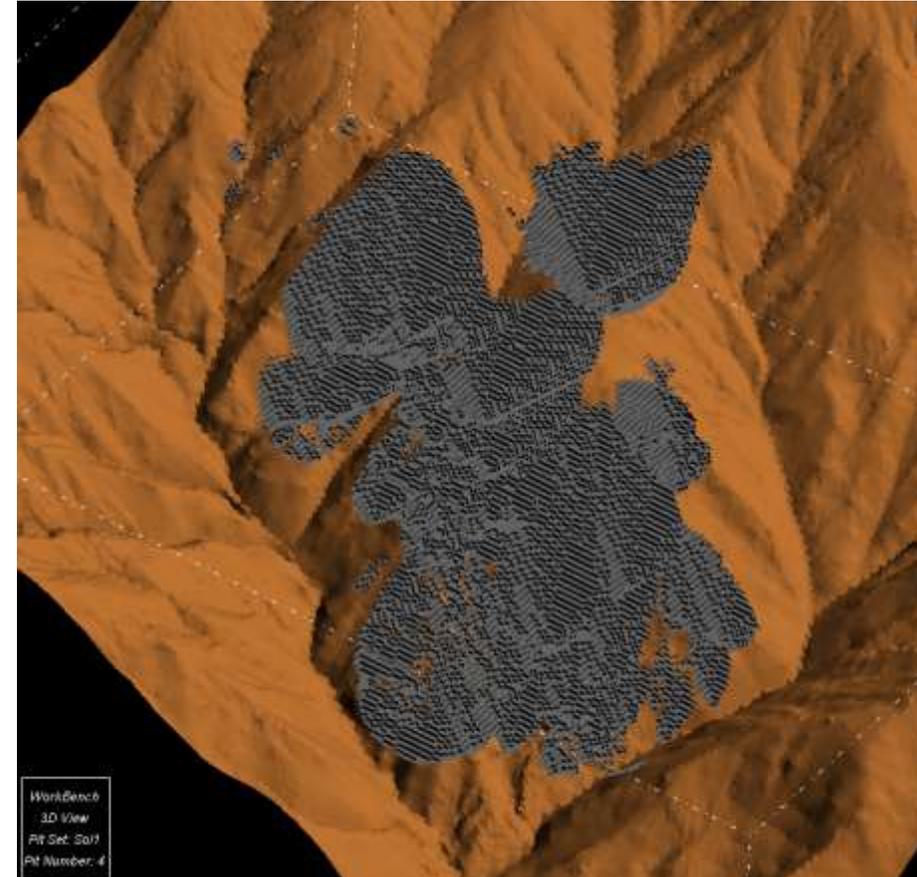


# Fin año 4

## Whittle Mine Schedule

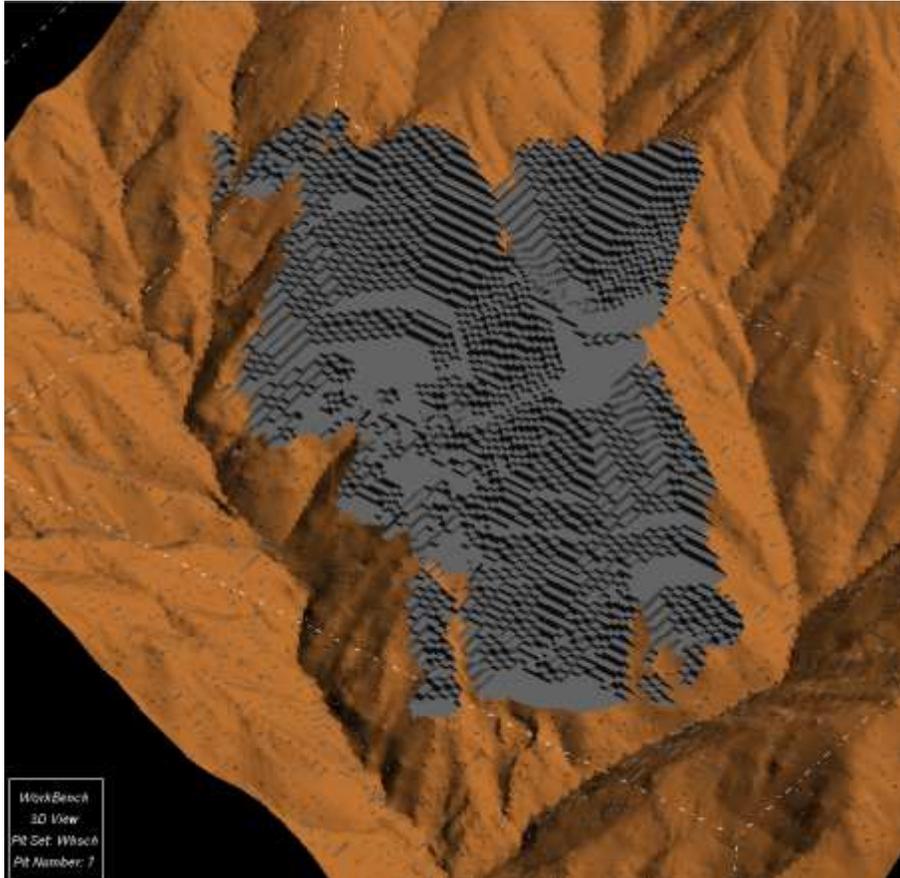


## Agendamiento de bloques

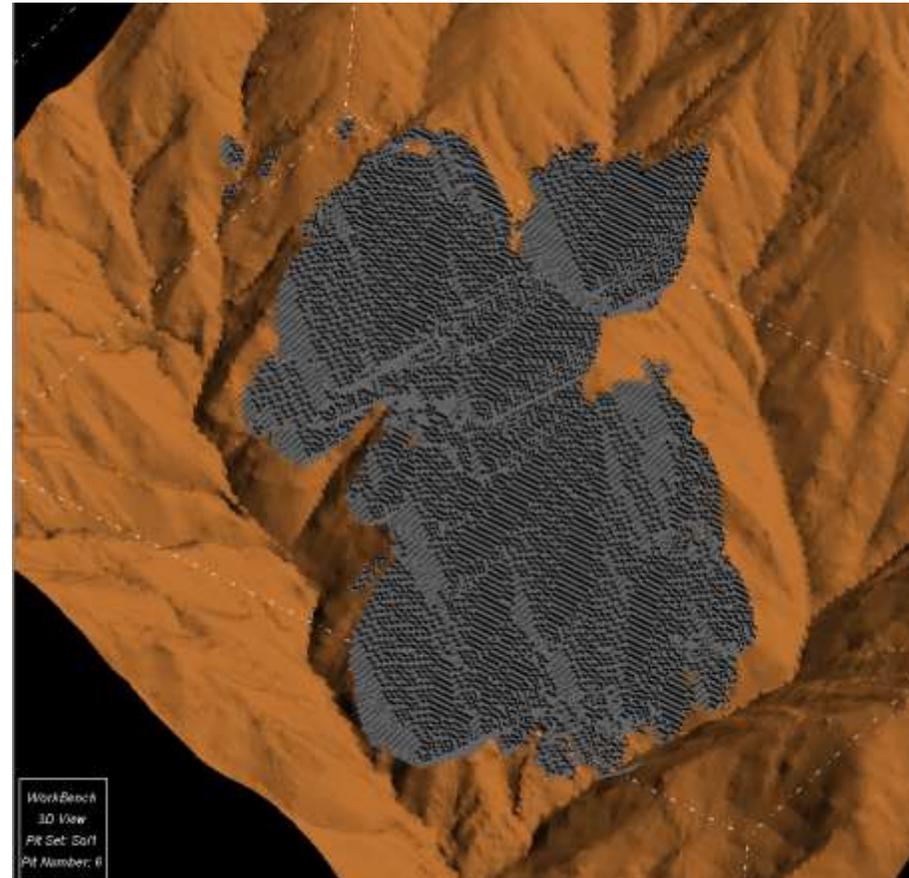


# Fin año 6

## Whittle Mine Schedule

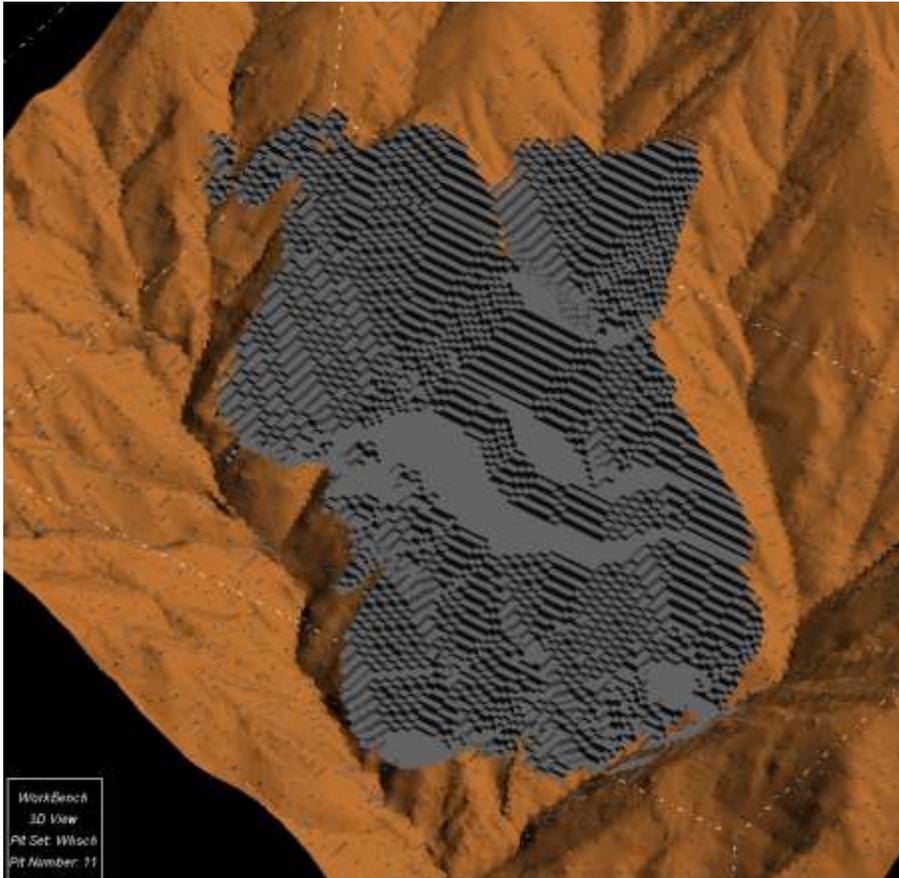


## Agendamiento de bloques

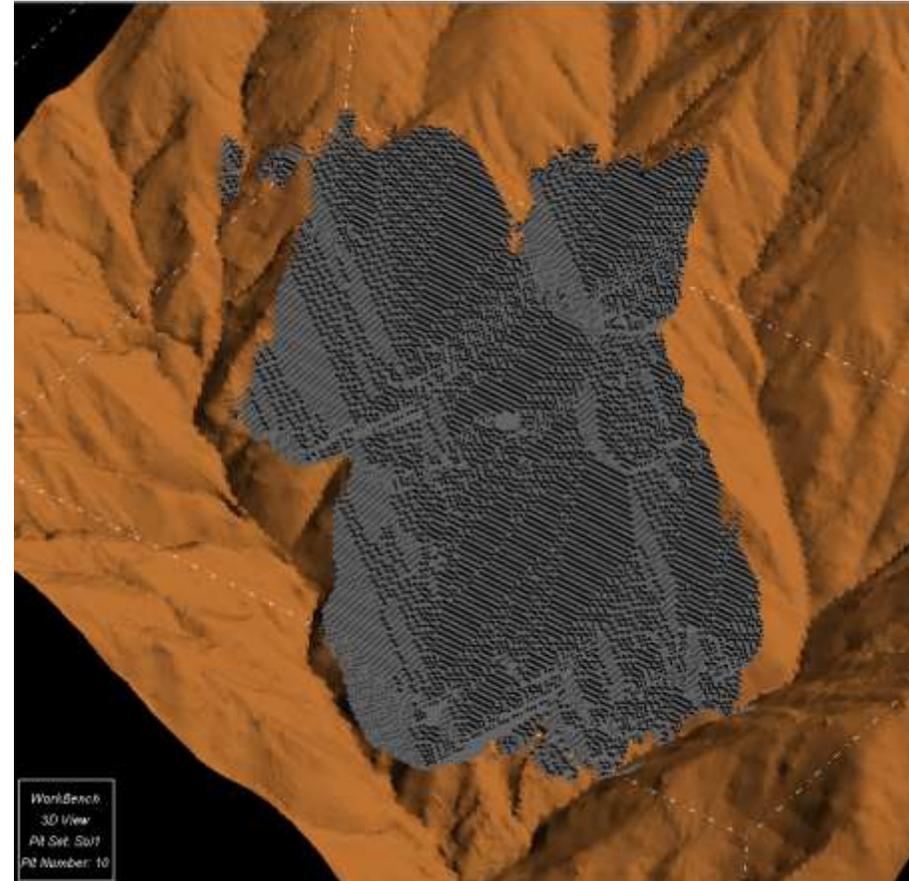


# Fin año 10

## Whittle Mine Schedule

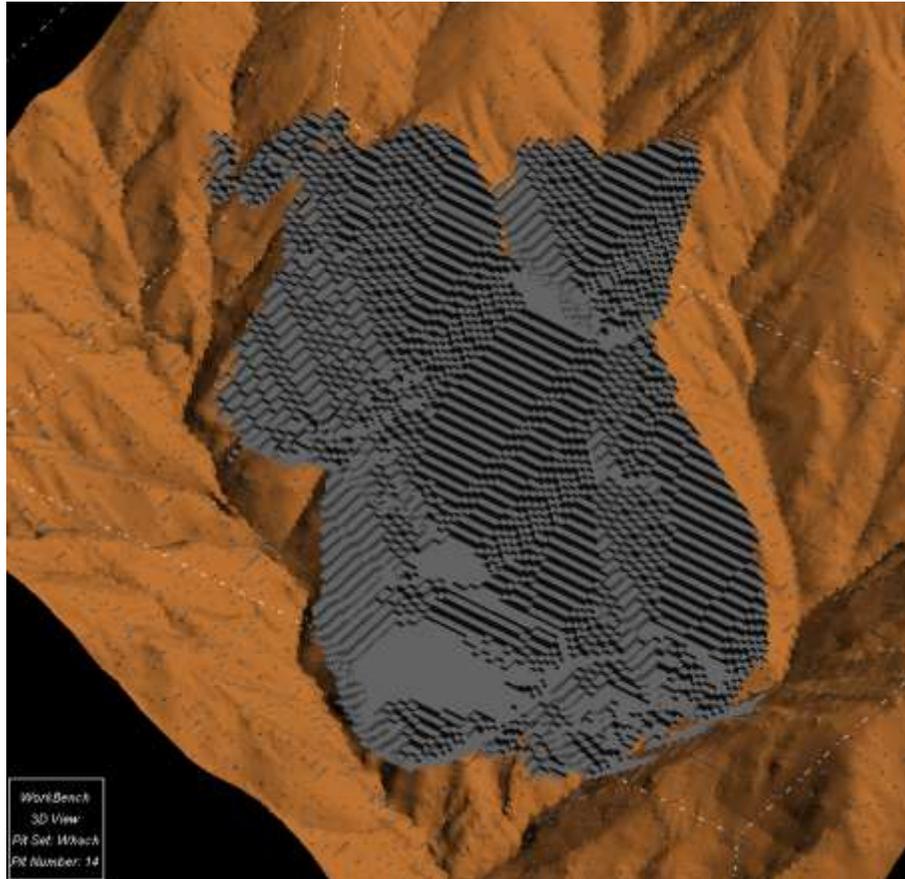


## Agendamiento de bloques

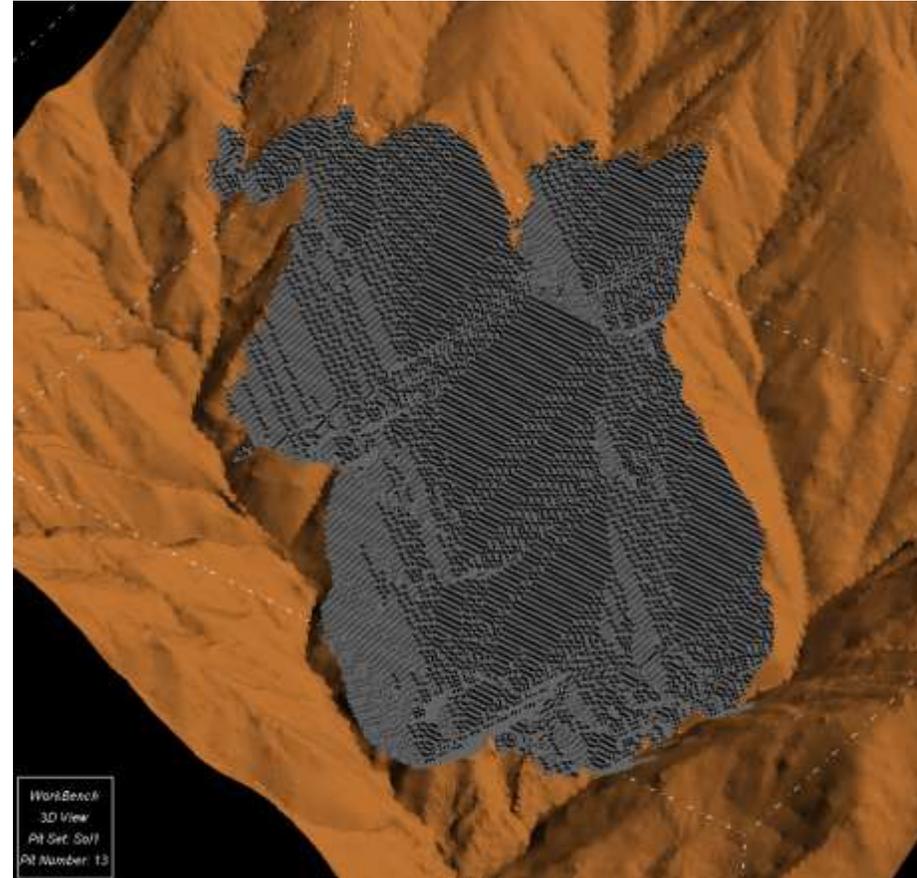


# Fin año 13

## Whittle Mine Schedule

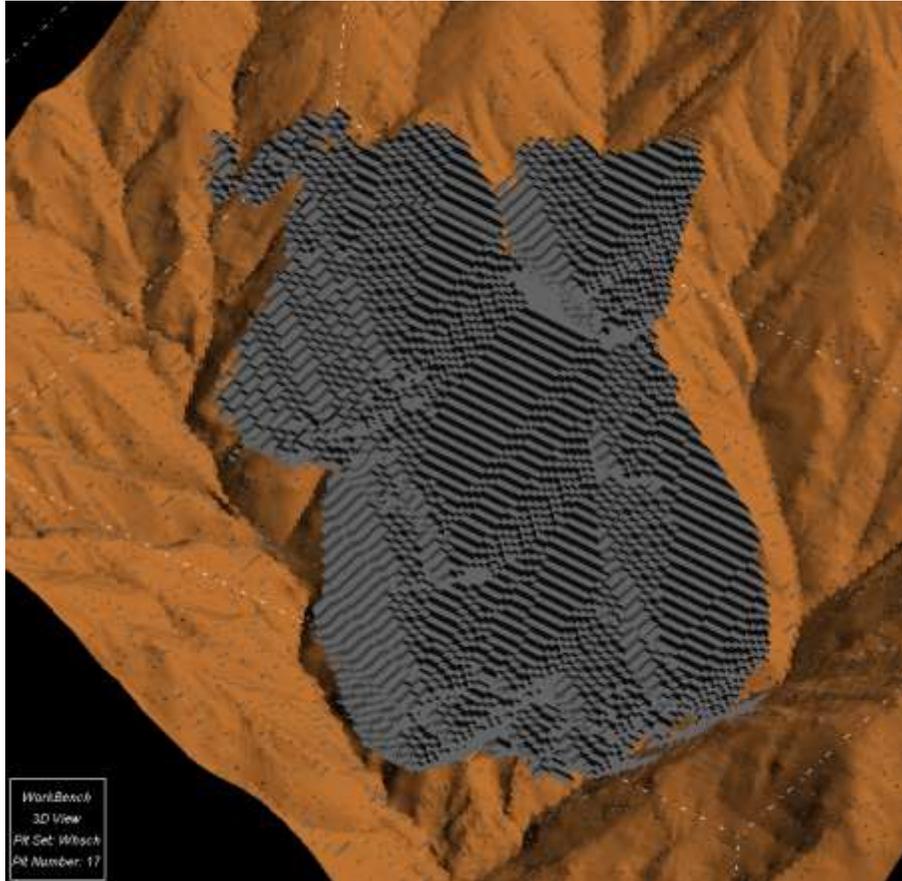


## Agendamiento de bloques



# Fin año 16

## Whittle Mine Schedule



## Agendamiento de bloques

