



# Presentación

---

---

## Planificación estratégica de explotaciones de caving por sub niveles en Mediana Minería

Ph.D Raúl Castro, Universidad de Chile  
M.Sc. Álvaro Altamirano, BCTEC Ingeniería y Tecnología

08 de Agosto 2016

# Contenidos

Minería Subterránea en Chile

Sublevel Stopping

Sublevel Caving

Planificación en Sublevel Caving

Casos de Estudios

Futuro

# Minería Subterránea - Chile

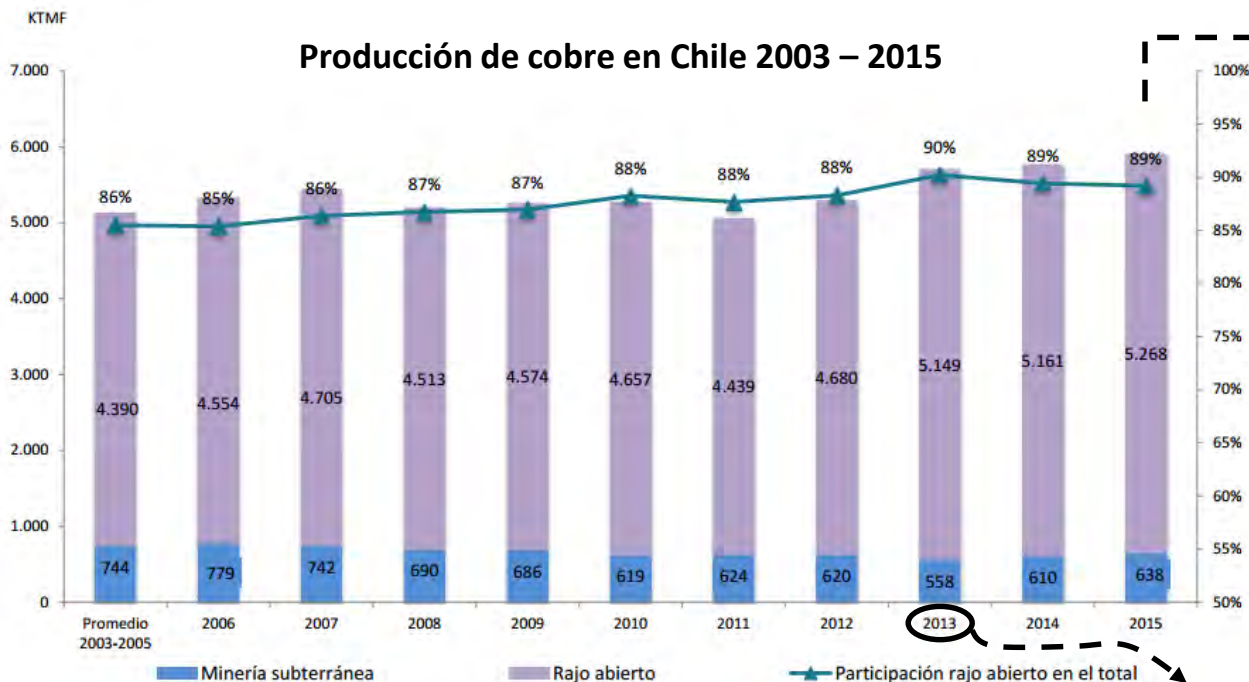
Mar Chileno



## Mayores Mineras en Chile

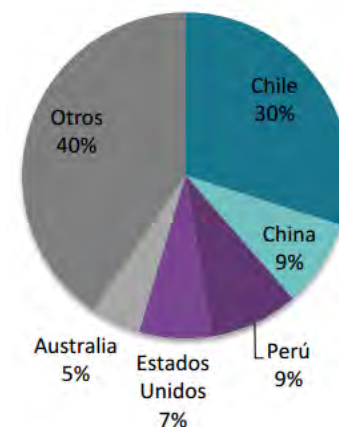
Mina	Producción (TM.)	Mineral	Ubicación
Amalia	11.300	Cobre	Catemu
Ancina	232.400	Cobre	80 km. al Noroeste de Santiago
Atacama Kozari	13.300	Cobre	Tierra Amarilla
Atacama Minerals	1.000	Yodo	100 km. al Sureste de Antofagasta
Candelaria	134.700	Cobre	29 km. al Sureste de Copiapó
Carmen de Andacollo	75.800	Cobre	55 km. al Sudeste de La Serena
Caserones	44.600	Cobre	162 km. al Sureste de Copiapó
Cemín	18.000	Cobre	Catemu
Centinela	274.500	Cobre	30 km. de Sierra Gorda
Cerro Colorado	79.600	Cobre	120 km. al Noroeste de Iquique
Cerro Dominador	150.000	Cobre	14 km. al Noroeste de Sierra Gorda
Cerro Negro	7.000	Cobre	210 km. al Noroeste de Santiago
Coemín	15.000	Cobre	22 km. al Sureste de Copiapó
Cosayach - Negreiros	770.000	Yodo	90 km. al Noroeste de Iquique
Cosayach - Soledad	770.000	Yodo	41 km. al Suroeste de Pozo Almonte
Chiquicamata	340.400	Cobre	40 km. al Norte de Calama
Dayton	35.000 oz	Oro	57 km. al Sureste de La Serena
Doña Inés de Collahuasi	170.400	Cobre	183 km. al Sureste de Iquique
El Abra	166.400	Cobre	76 km. al Norte de Calama
El Algarrobo (ICMP)	12.000.000	Hierro	Sucoeste de Vallenar
El Peñón	452.000 oz	Oro	160 km. al Sureste de Antofagasta
El Soldado	51.500	Cobre	132 km. de Santiago
El Teniente	455.500	Cobre	80 km. al Sur de Santiago
El Toqui	23.000	Zinc	XI Región
Escondida	1.165.400	Cobre	170 km. al Sureste de Antofagasta
Florida	119.500 oz	Oro	180 km. al Sureste de Santiago
Gabriela Mistral	121.000	Cobre	120 km. al Suroeste de Calama
Guanaco	3.000 oz	Oro	220 km. al Sureste de Antofagasta
Las Cenizas	7.000	Cobre	35 km. al Sur de Taltal
Lomas Bayas	66.400	Cobre	110 km. al Noroeste de Antofagasta
Los Bronces	416.300	Cobre	50 km. al Noroeste de Santiago
Los Pelambres	404.600	Cobre	45 km. al Este de Salamanca
Mantos Blancos	54.600	Cobre	45 km. al Noroeste de Antofagasta
Mantos de La Luna	23.000	Cobre	35 km. al Sur de Tocopilla
Mantos de Oro	178.000 oz	Oro	140 km. al Noroeste de Copiapó
Mantoverde	56.800	Cobre	56 km. del Puerto de Chañaral
Michilla	47.000	Cobre	130 km. al Noroeste de Antofagasta
Ministro Hales	141.200	Cobre	5 km. al Norte de Calama
Ojos del Salado	23.600	Cobre	16 km. al Este de Copiapó
Pampa Camarones		Cobre	50 km. al Sureste de Arica
Pimentón	70.000 oz	Oro	175 km. al Norte de Santiago
Pucobre	100.000	Cobre	20 km. de Copiapó
Quebrada Blanca	48.100	Cobre	240 km. al Sureste de Iquique
Quiborax	36.000	Bórax	69 km. de Arica
Radomiro Tomic	327.300	Cobre	40 km. al Norte de Calama
Salvador	54.000	Cobre	Diego de Almagro, 150 km. al Norte de Chañaral
San Gerónimo	9.000	Cobre	20 km. al Noroeste de La Serena
Sierra Gorda	12.700	Cobre	60 km. al Suroeste de Calama
Sociedad Chilena de Litio	41,2 MM Lbs.	Litio	25 km. al Sureste de Antofagasta
Spence	176.100	Cobre	140 km. de Antofagasta
Tres Valles	19.000	Cobre	10 km. al Norte de Salamanca
Valla Central	71.000	Cobre	8 km. al Sureste de Rancagua
Zaldívar	100.600	Cobre	175 km. al Sudeste de Antofagasta

# Minería Subterránea - Chile



11% - Minería Subterránea

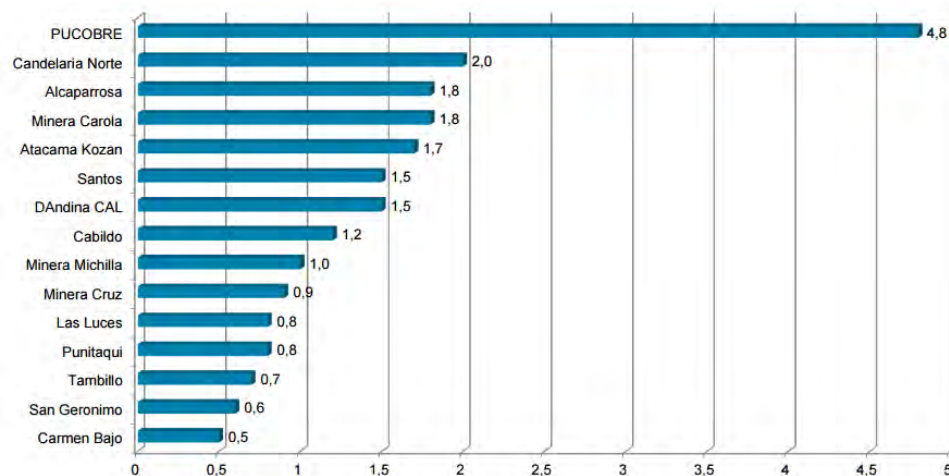
## Producción Mundial de Cobre 19.249 KTMF



Fuente: Consejo Minero a partir de información de Cochilco.

## Mediana Minería - Chile

El sistema de explotación en la mediana minería es principalmente por método subterráneo, con una producción entre 300 a 8.000 tpd, lo que significa de 100.000 a 3 Millones de toneladas de mineral/año.



Zablocki, 2013 (Atlas Copco)

Millones toneladas/año

# Minería Subterránea

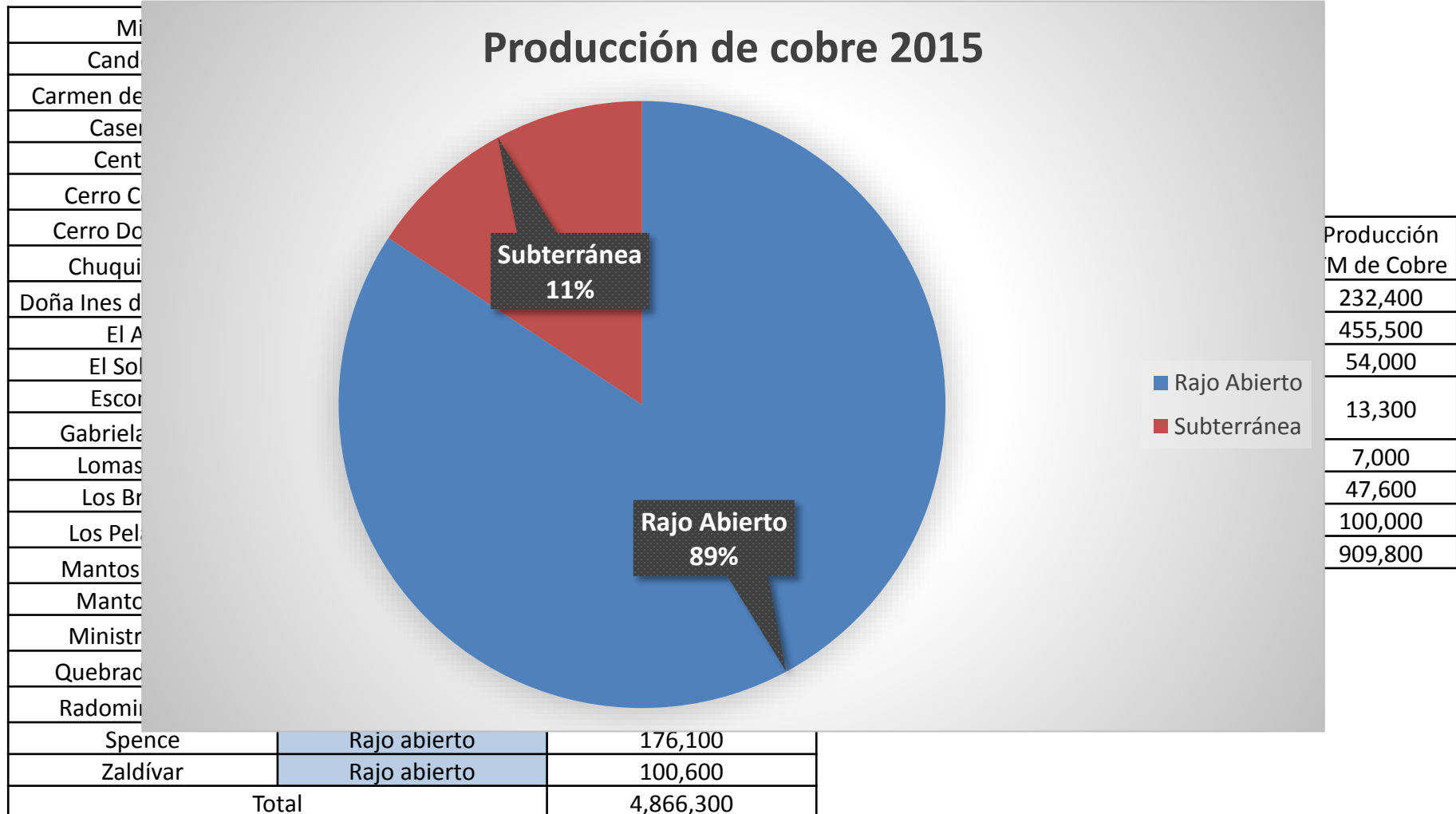
## Rajo abierto vs subterránea - Cobre

Mina	Método de explotación	Producción TM de Cobre
Candelaria	Rajo abierto	134,700
Carmen de Andacollo	Rajo abierto	75,800
Caserones	Rajo abierto	44,600
Centinela	Rajo abierto	274,500
Cerro Colorado	Rajo abierto	79,600
Cerro Dominador	Rajo abierto	150,000
Chuquicamata	Rajo abierto	340,400
Doña Ines de Collahuasi	Rajo abierto	470,400
El Abra	Rajo abierto	166,400
El Soldado	Rajo abierto	51,500
Escondida	Rajo abierto	1,165,400
Gabriela Mistral	Rajo abierto	121,000
Lomas Bayas	Rajo abierto	66,400
Los Bronces	Rajo abierto	416,300
Los Pelambres	Rajo abierto	404,600
Mantos Blancos	Rajo abierto	54,600
Manto verde	Rajo abierto	56,800
Ministro Hales	Rajo abierto	141,200
Quebrada Blanca	Rajo abierto	48,100
Radomiro Tomic	Rajo abierto	327,300
Spence	Rajo abierto	176,100
Zaldívar	Rajo abierto	100,600
Total		4,866,300

Mina	Método de explotación	Producción TM de Cobre
Andina	Block Caving	232,400
El Teniente	Block Caving	455,500
Salvador	Block Caving	54,000
Atacama Kozan	Sub level Stoping	13,300
Las Cenizas	Sub level Stoping	7,000
Michilla	Sub level Stoping	47,600
Pucobre	Sub level Stoping	100,000
Total		909,800

# Minería Subterránea

## Rajo abierto vs subterránea - Cobre



# Minería Subterránea

## Rajo abierto vs subterránea - Oro

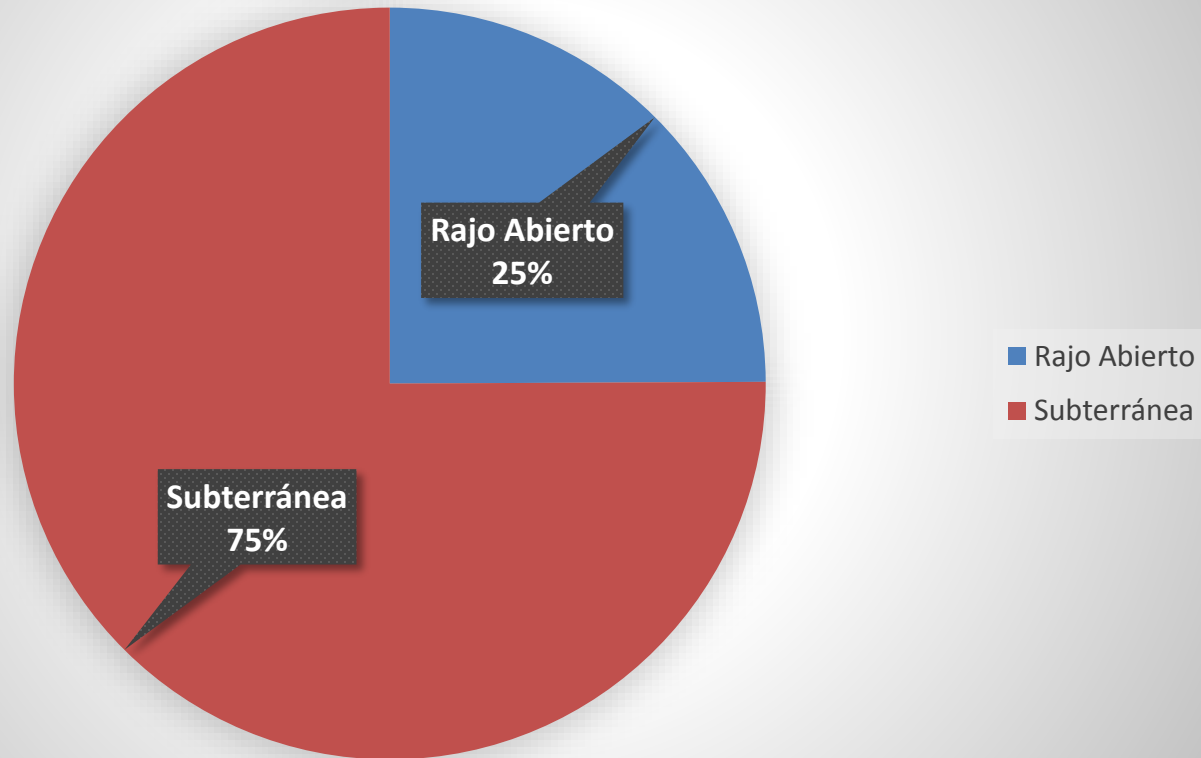
Mina	Método de explotación	Producción oz de Oro
Dayton	Rajo abierto	35,000
Mantos de Oro	Rajo abierto	178,000
Total		213,000

Mina	Método de explotación	Producción oz de Oro
Florida	Sub level Stoping	119,500
El Peñón	Sub level Stoping	452,000
Pimentón		70,000
Total		641,500

# Minería Subterránea

## Rajo abierto vs subterránea - Oro

Producción de oro



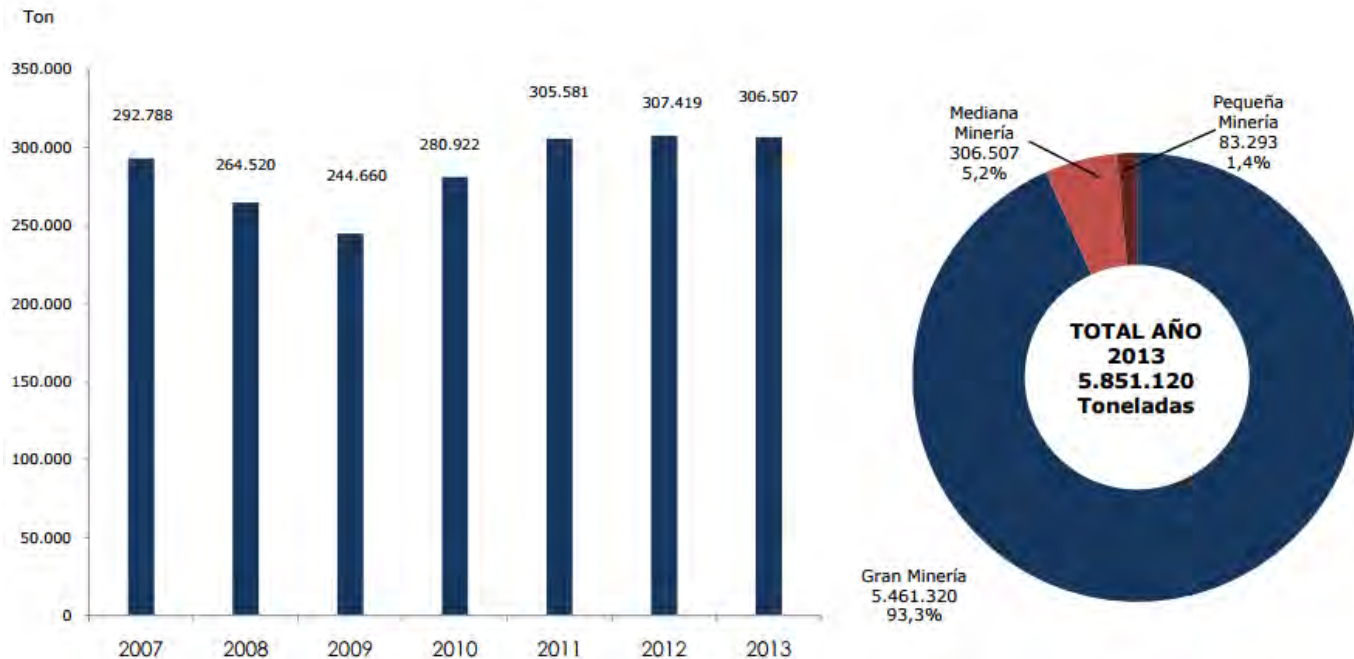
Minera
Dayton
Mantos
Oro

Producción
z de Oro
119,500
452,000
70,000
641,500



# Minería Subterránea – Mediana Minería

## Producción de cobre de la mediana minería en Chile (2007-2013)

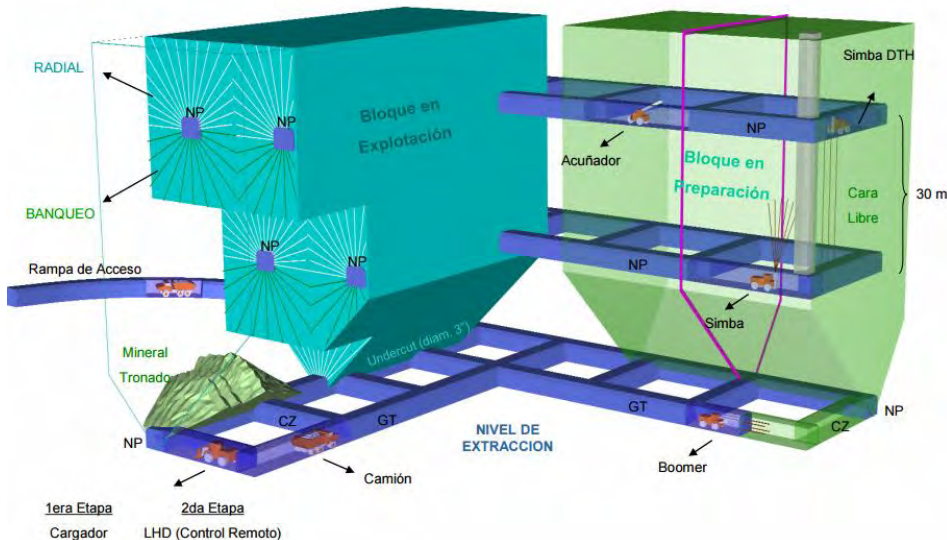


Fuente: Sernageomin

### Desafíos (Sergio Hernández, 2014 - Cochilco):

- Retos : costos, escasas hídrica, falta de mano de obra calificada y alto precio de la energía.
- Aumentar y diversificar las fuentes de financiamiento
- Asociaciones con empresas de la gran minería para explotar yacimientos de tamaño medio.
- Aumentar los niveles de eficiencia y productividad. Hacer frente a precios más acotados.
- Aumentar inversiones propias en exploración.

# Sublevel Stopping – Sublevel Caving

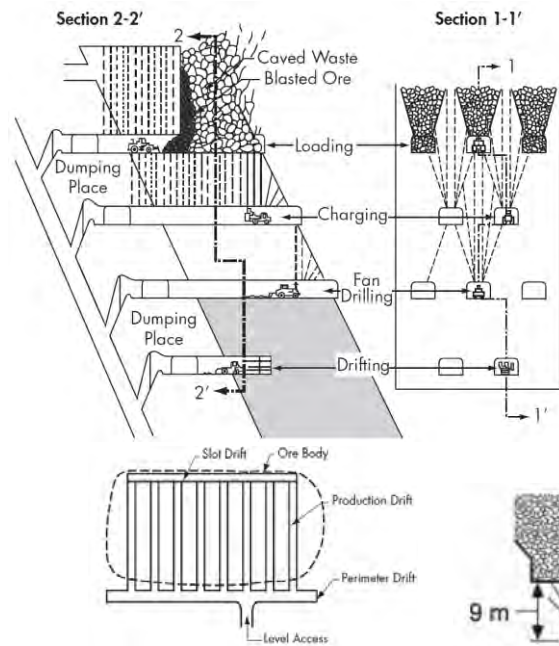


## Sublevel Stopping Ventajas:

- Favorable para mecanización.
- Tasa de producción moderada a alta (25.000 ton/mes)
- Recuperación sobre 90%.
- Dilución: < 20%.
- Perforaciones pueden adelantarse.

## Desventajas:

- Gran capital: Bastantes desarrollos antes de inicial la producción.
- No selectivo.
- Ineficiente a bajas inclinaciones.

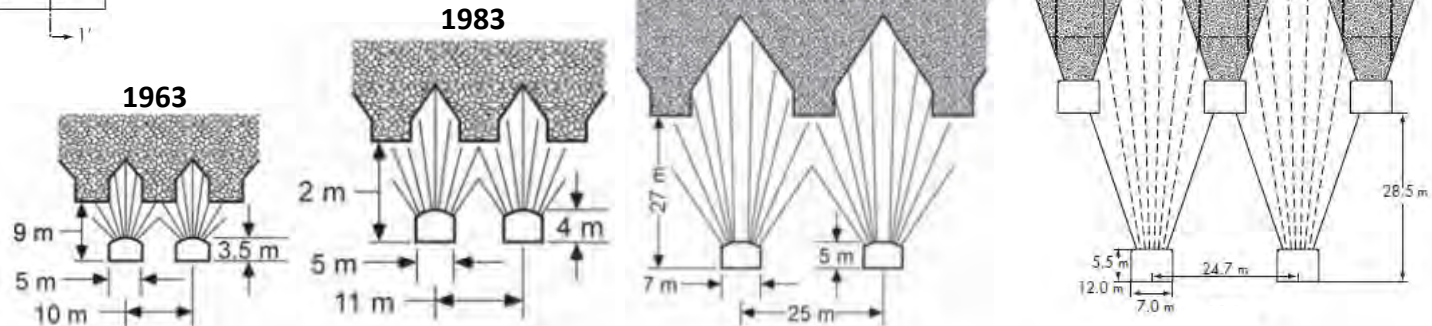


## Ventajas Sublevel Caving:

- Alta capacidad productiva.
- Layout general: simple y regular.
- Desarrollo, tronadura y manejo de mineral se realizan en niveles distintos, con escasa interferencia.
- Intensiva utilización de equipos mecanizados de alta productividad.

## Desventajas:

- Alta dilución, por lo menos un 25%.
- Altos desarrollos.



2008

2003

1983

1963

# Sublevel Caving

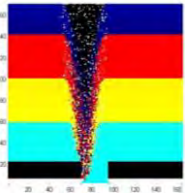
FlowSim Sub Level Caving → Entrega una mayor confiabilidad del plan minero (dilución y leyes extraídas).

Desafíos (Sergio Hernández, 2014 - Cochilco):

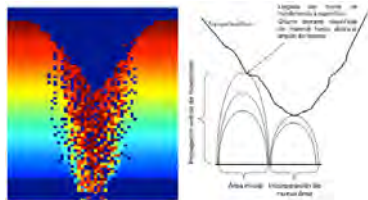
- Retos: costos, escasez hídrica, falta de mano de obra calificada y alto precio de la energía.
- Aumentar y diversificar las fuentes de financiamiento
- Asociaciones con empresas de la gran minería para explotar yacimientos de tamaño medio
- Aumentar los niveles de eficiencia y productividad. Hacer frente a precios más acotados.
- Aumentar inversiones propias en exploración.

Evaluación simulación - FlowSim → Evaluación de múltiples escenarios de flujo para diferentes estrategias de extracción en menor tiempo de simulación.

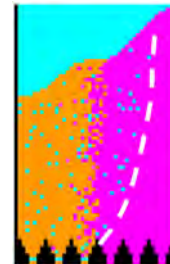
# Herramientas de Simulación - Caving



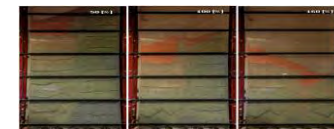
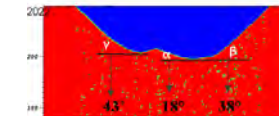
FlowSim 1.0 (MATLAB)  
(Castro 2006)



Desarrolló e Integró Modelo de  
Flujo Preferencial en FlowSim  
versión 2D (MATLAB)  
(Valencia 2014)

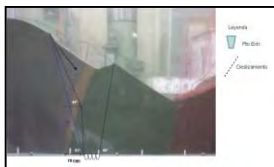


Desarrolló e Integró Modelo de  
Flujo Preferencial en FlowSim  
versión 3D (C++)  
(González 2014)



Implementación de rilling y calibración  
con experimentos de flujo  
(Fuentes, 2015)

(González 2012)  
Aplicación a CHS y  
calibración con  
experimentos.



(BCTEC 2014)

Asignación proyecto CORFO  
para el desarrollo de  
FlowSim.



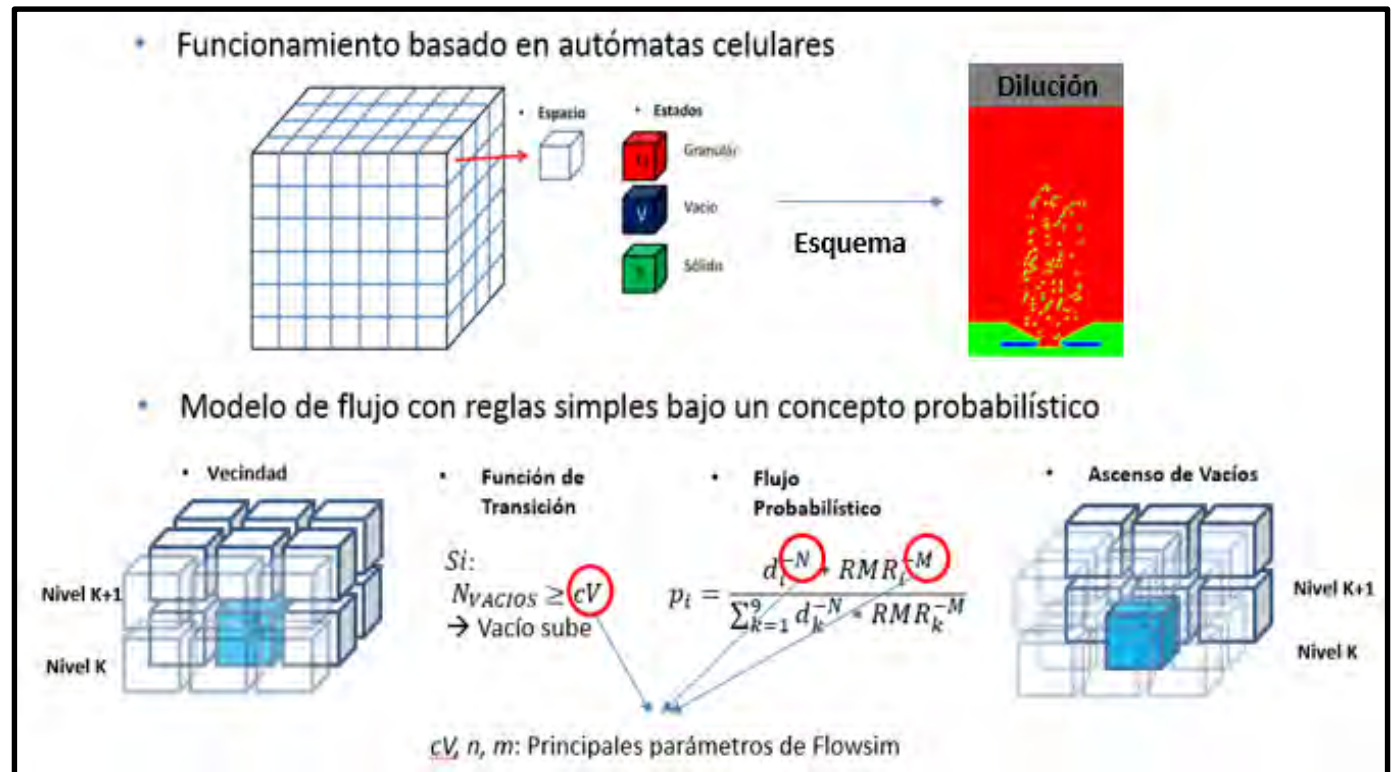
(BCTEC 2014 - 2015)

Prototipo FlowSim SLC



# FlowSim Sublevel Caving

- Inputs:
  - Modelo de bloques
  - Ubicación espacial de calles de producción
  - Ritmo de producción
  - Secuenciamiento de extracción
  - Criterios de extracción



# FlowSim Sublevel Caving

- Objetivo

Desarrollar una herramienta que emule el flujo gravitacional en una mina de Sub Level Caving, permitiendo la generación de planes de producción en base a criterios de planificación para la extracción.

- Objetivos Específicos

- Emular una mina de Sub Level Caving.
- Criterios de planificación FlowSim SLC.
- Cuantificar diferentes escenarios de extracción de forma simultanea.
- Obtener un plan minero en base al análisis de resultados de dilución, recuperación y cobre fino desde las simulaciones.

# FlowSim SLC

## FlowSim SLC 1.0

### FlowSim SLC Predic 1.0

#### Yacimiento

- Modelo de Bloques

#### Modelo Económico

- Se define las Reservas.
- Ley de Corte.
- Ley Media In-situ.
- Dilución Planificada.

#### Diseño Minero

- Largo de Calle
- Distancia entre Subniveles
- Distancia entre Calles
- Burden
- Toneladas por Abanico.

#### Estrategia de Extracción

- No de Niveles simultáneos.
- Secuenciamiento calles
- Velocidad de Extracción.
- Angulo de extracción entre calles

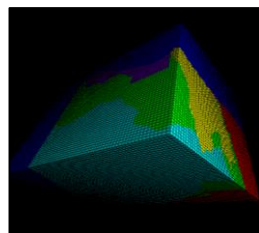
#### FlowSim SLC

- Variación Ley de Corte
- Criterio Máxima extracción.
- Criterio Mínima Extracción.

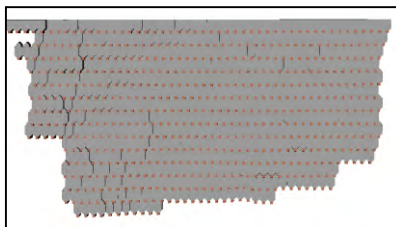
#### Plan Minero

- Tonelaje Extraído – Tonelaje de Fino por Año
- Ley Media por Nivel
- Dilución No Planificada

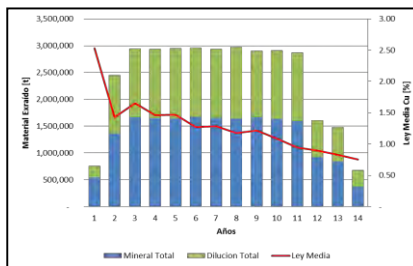
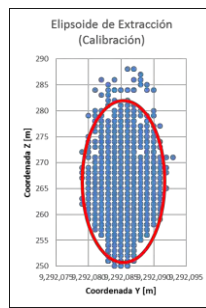
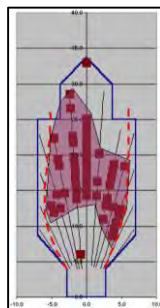
### Modelo Bloques



Diseño Mina



### Calibración de elipsoide



Plan de producción

### FlowSim SLC Plan 1.0

#### Yacimiento

- Modelo de Bloques

#### Modelo Económico

- Ley de Corte.
- Ley Media In-situ.
- Dilución Planificada.

#### Diseño Minero

- Largo de Calle
- Distancia entre Calles
- Burden

#### FlowSim SLC

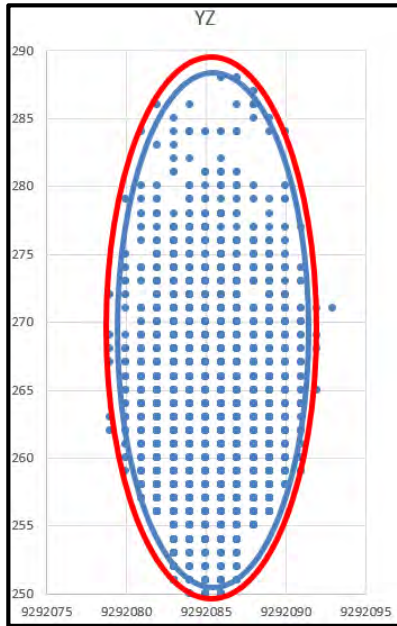
- Cada Ring es considerado un punto y extrae la cantidad de tonelaje desacuado a un plan de producción.

#### Plan Minero

- Tonelaje Extraído – Tonelaje de Fino por Año
- Ley Media por Nivel
- Dilución No Planificada

# FlowSim SLC – Calibración

Calibración - 1

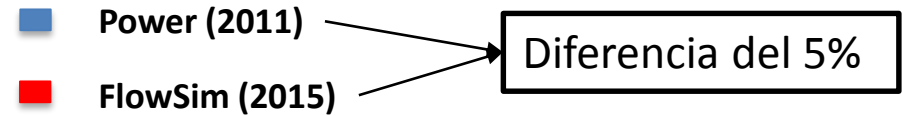


Punto Aislado

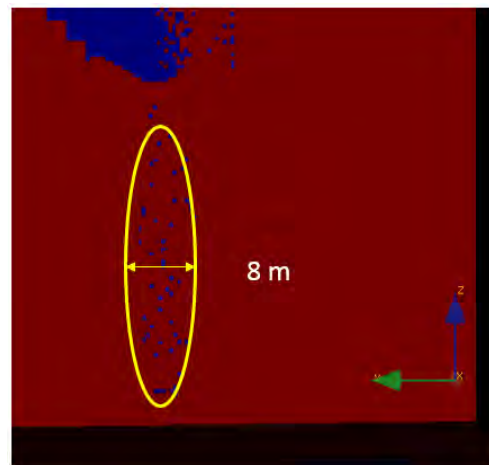
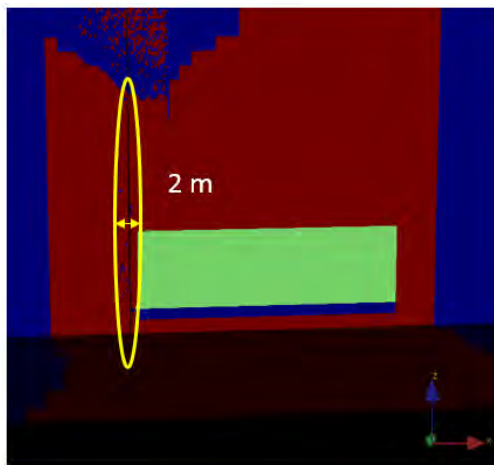
Parámetros Calibración	Valor
Cv	4
n	3.5
m	0.5
Tonelaje	6,237
Ancho	10,5 m
Alto	30 – 33 m

- **Geoff Dustan and Gavin Power (2011)**

Zona de recuperación primaria con ancho de 10 m (promedio). Las zonas de recuperación primaria no interactúan.



Calibración - 2



Parámetro Calibración	Valor
cv	3
n	5
m	0.5
Tonelaje	1200
Ancho	11 - 13 m
Alto	35 - 40 m

Probabilidades		
0.083	0.125	0.083
0.083	0.25	0.083
0.083	0.125	0.083



# FlowSim SLC – Criterios de Planificación

- Ritmo de extracción máximo tpd.
- Máxima extracción diaria en abanico.
- Máxima y mínima extracción por abanico.
- Secuenciamiento de extracción entre calles y niveles.
- Ángulos entre niveles y calles.
- Máximo número de niveles simultáneos en extracción.
- Cierre de abanico (Criterio Ley de corte).

# FlowSim SLC – Criterios de Planificación

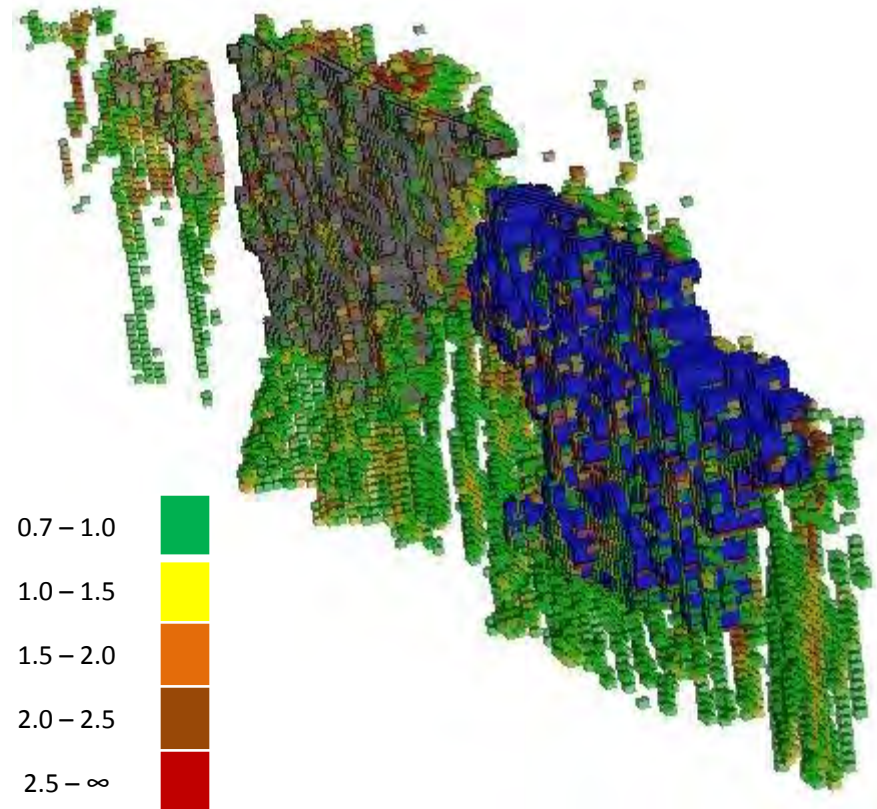
## Datos de entrada Simulación

- Cuantificación de Reservas

- Mina Sub Level Caving de Cu(Primario)-Au(Secundario)
- Tonelaje: 33.1 MT
- Ley media: 1.43%
- Dilución planificada: 35.5%

- Datos de Entrada

- Ley de corte: 0.80%
- Ritmo mina: 7,200 tpd
- Largo calle: ~40 metros
- Máx. extracción abánico: 400 tpd
- Burden: 2.0 m
- 17 Niveles



# FlowSim Sublevel Caving

## Interfaz Usuario

The screenshot shows the FlowSim SLC software interface. The main window is titled 'FLOWSIM SLC' and has a menu bar with 'File', 'Simulation', and 'Help'. Below the menu bar are tabs for 'Inputs', '3D', '2D', and 'Results'. The interface is divided into several panels:

- Archivos:** A section for data files with a list of files and their paths, each with a 'Browse file' button. The files listed are: 'Modo de simulacion productiva', 'Model Block', 'Drawpoints', 'Secuenciamiento', 'Ritmo', 'Trazadores', and 'Plan produccion'.
- Calibración:** A section for simulation parameters, including 'Simulation' (Voids threshold, Pile threshold, N probability, Exponente m, Shovel, Influence, Flujo preferenc), 'Weights' (p0 to p8), and 'Drawbell Geometry' (DrawPoint Width, DrawPoint Height, Bell Height, Alpha angle, Beta angle, Espaciamento, Espaciamento Z).
- Restricciones:** A section for restrictions with a list of parameters and values: 'Distancia de avance extraccion (mts)', '% dilucion extraida', 'Tonelaje de ring', 'Tonelaje maximo diario extraido', 'Tonelaje muestreo', 'Ley de cierre', and '# observaciones bajo ley de cierre'.
- Dimensiones:** A section for model dimensions, including 'Original Model Block' (Origin, Translation, Rotation, # Blocks, Dim. Blocks, Total blocks) and 'Discretized Model Block' (Origin, # Blocks, Dimension Blocks, Total blocks).
- Project:** A section for project information, including 'Project', 'Nombre Proyecto', 'Fecha inicio simulacion', 'Numero de periodos a simular', and 'Frecuencia de impresion de periodos'.
- Output:** A section for output options, including 'points', 'vtk', 'elipses', and 'grid'.

Red circles are drawn around the 'Archivos', 'Calibración', 'Restricciones', and 'Dimensiones' sections, highlighting them.

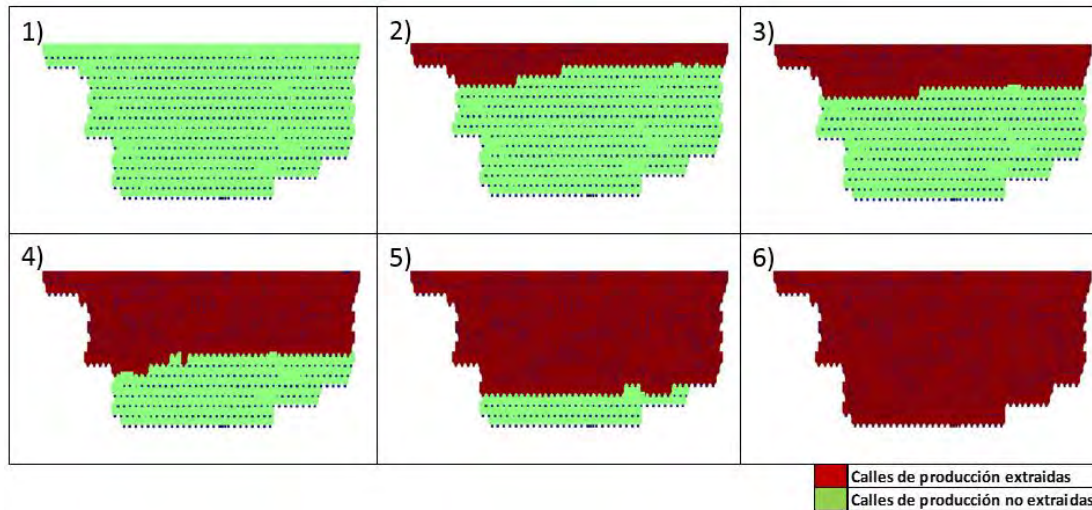
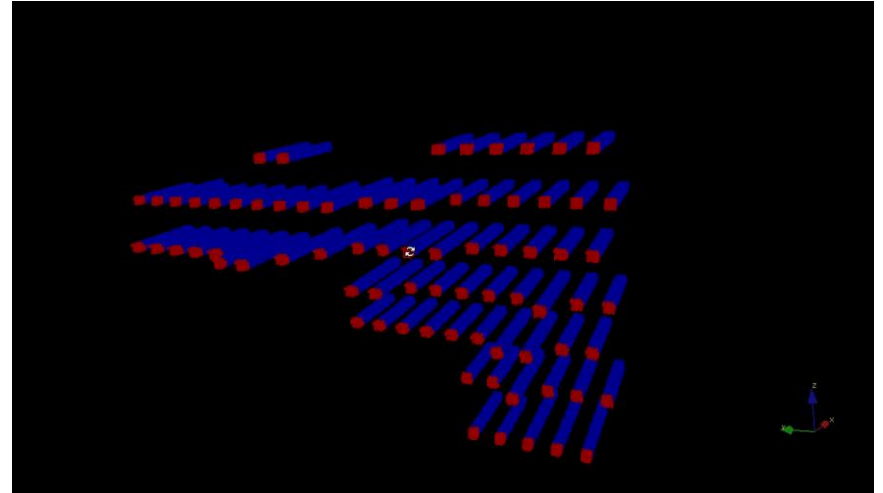
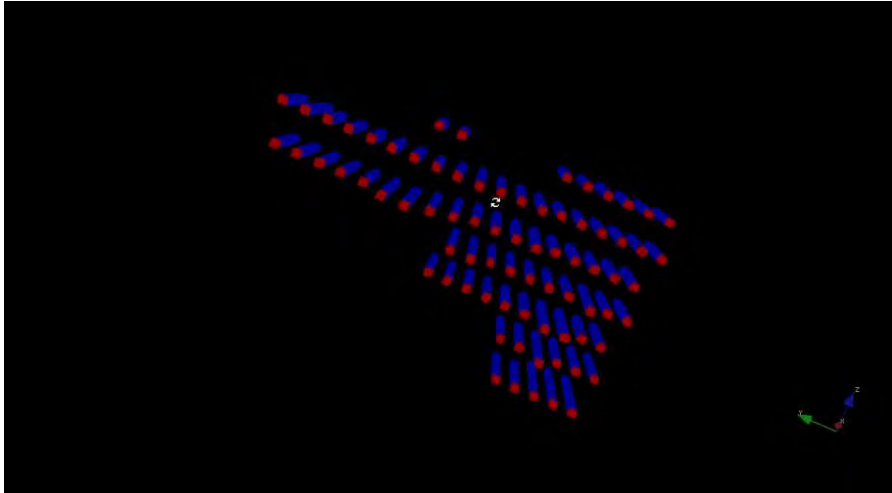
# FlowSim SLC – Escenarios de Extracción

## Criterio Planificación

## Resultados Simulación

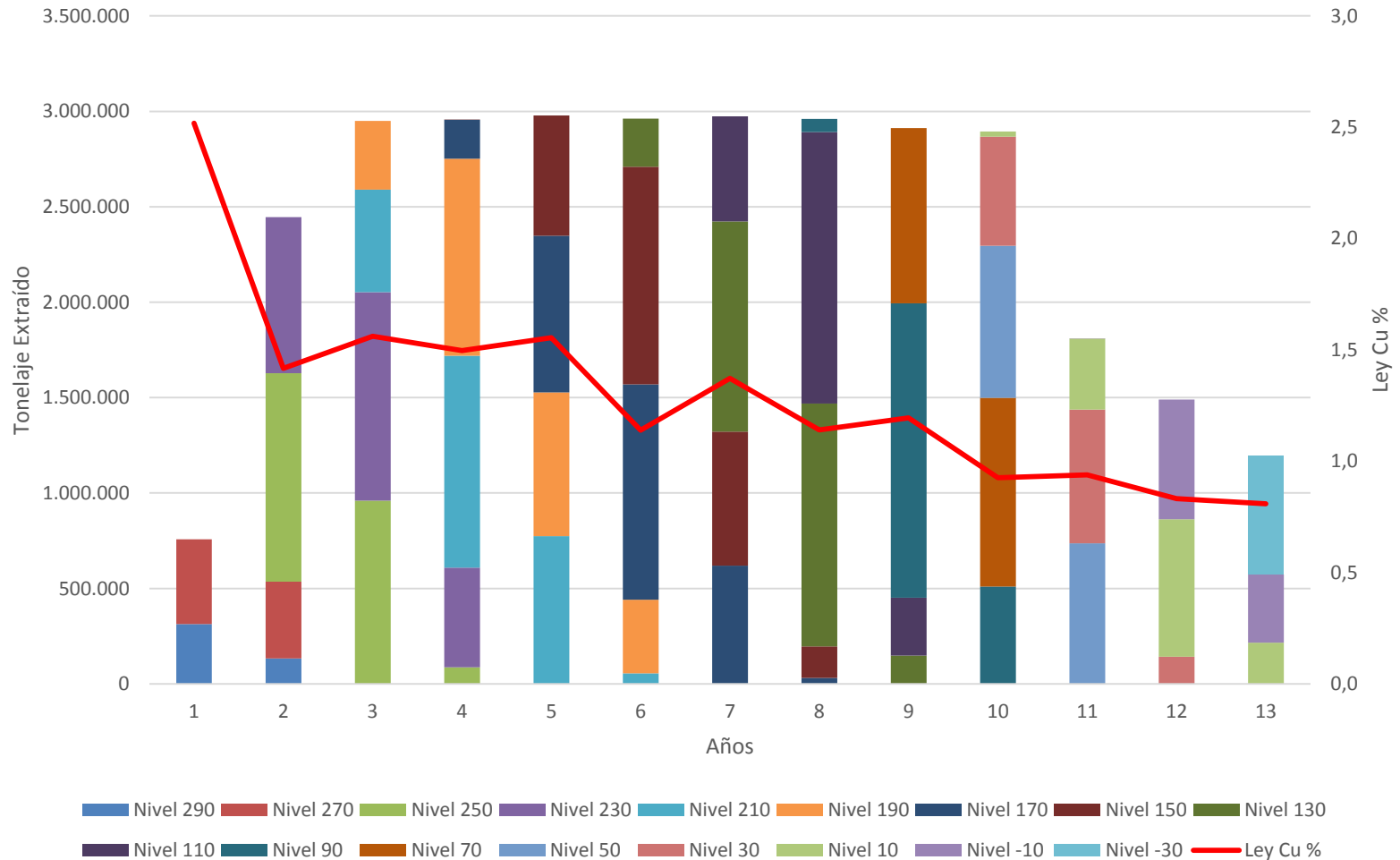
Casos	Criterio Planificación			Resultados Simulación			
	Ley de Cierre (Lc) (%)	Extracción Mín. Abanico (%)	Extracción Máx. Abanico (%)	LOM [años]	Tonelaje [t]	Fino Cu [t]	Ley Cu [%]
				In-situ	26,509,670	356,054	1.34
1	0.80	100	100	13	25,033,130	299,511	1.20
2	0.80	30	120	14	25,489,686	311,677	1.22
3	0.80	30	130	14	26,701,328	318,686	1.19
4	0.80	30	140	15	27,886,856	324,341	1.16
5	0.80	30	∞	20	40,781,523	350,774	0.86
6	0.72	100	100	14	25,756,686	303,730	1.18
7	0.72	30	120	14	26,839,896	318,956	1.19
8	0.72	30	130	15	28,256,042	326,576	1.16
9	0.72	30	140	16	29,559,025	332,413	1.12
10	0.72	30	∞	22	44,916,229	362,909	0.81

# FlowSim SLC – Visualización

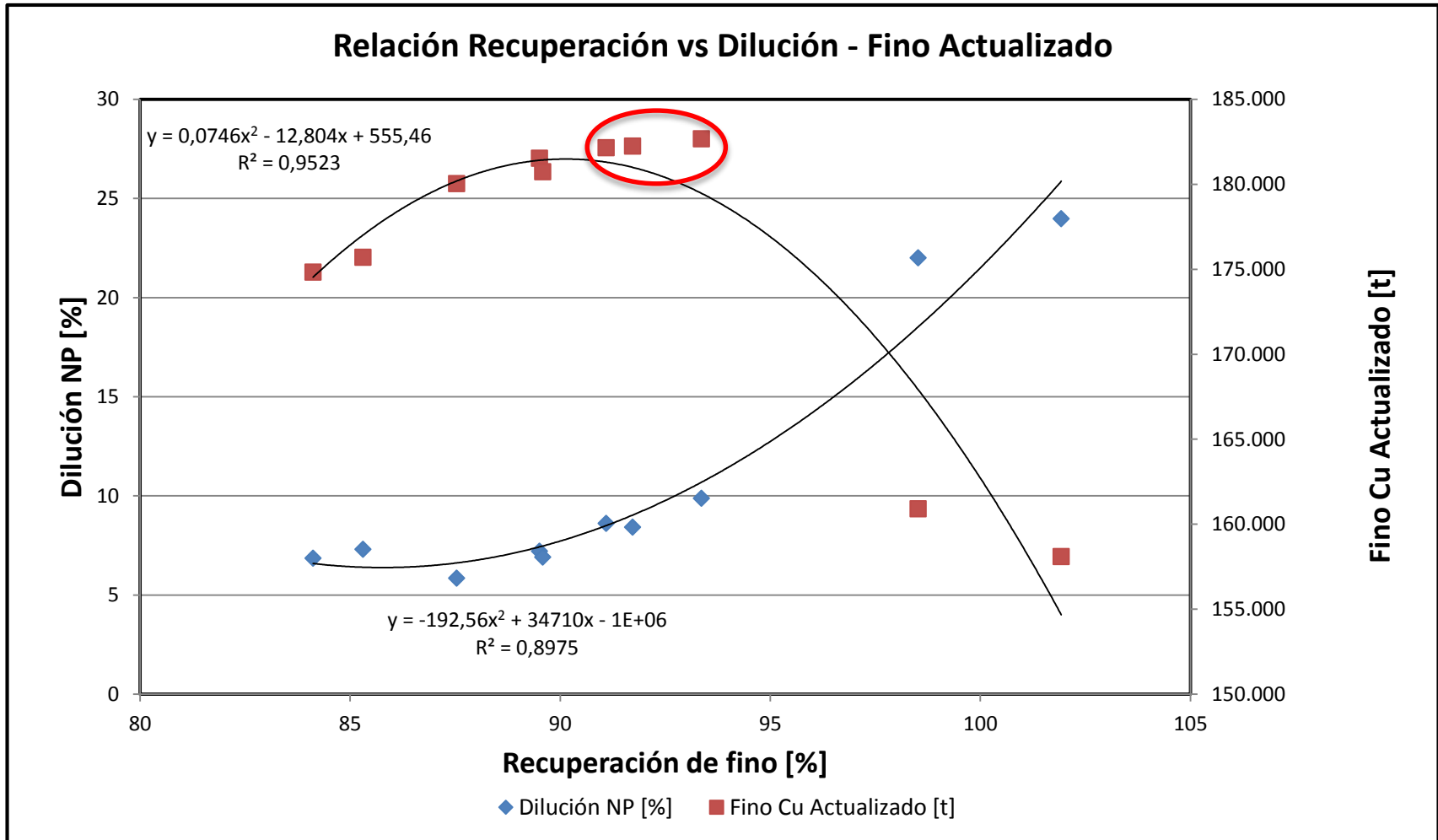


# FlowSim SLC – Plan de Producción

## Ejemplo - Caso 1: Criterio 100% - Calle < Lc= 0.72% - 30% Extracción



# FlowSim SLC – Análisis de Resultados



# FlowSim SLC – Conclusiones

1. El SLC es un método subterráneo masivo de bajo costo y alta recuperación/ productividad aplicable a mediana minería.
2. Su principal desventaja es la cantidad de dilución lo cual requiere una planificación estratégica.
3. FlowSim SLC permite evaluar escenarios de planificación y definir la estrategia de extracción permitiendo obtener el máximo valor del yacimiento.





# Presentación

---

---

## Planificación estratégica de explotaciones de caving por sub niveles en Mediana Minería

Ph.D Raúl Castro, Universidad de Chile  
M.Sc. Álvaro Altamirano, BCTEC Ingeniería y Tecnología

08 de Agosto 2016