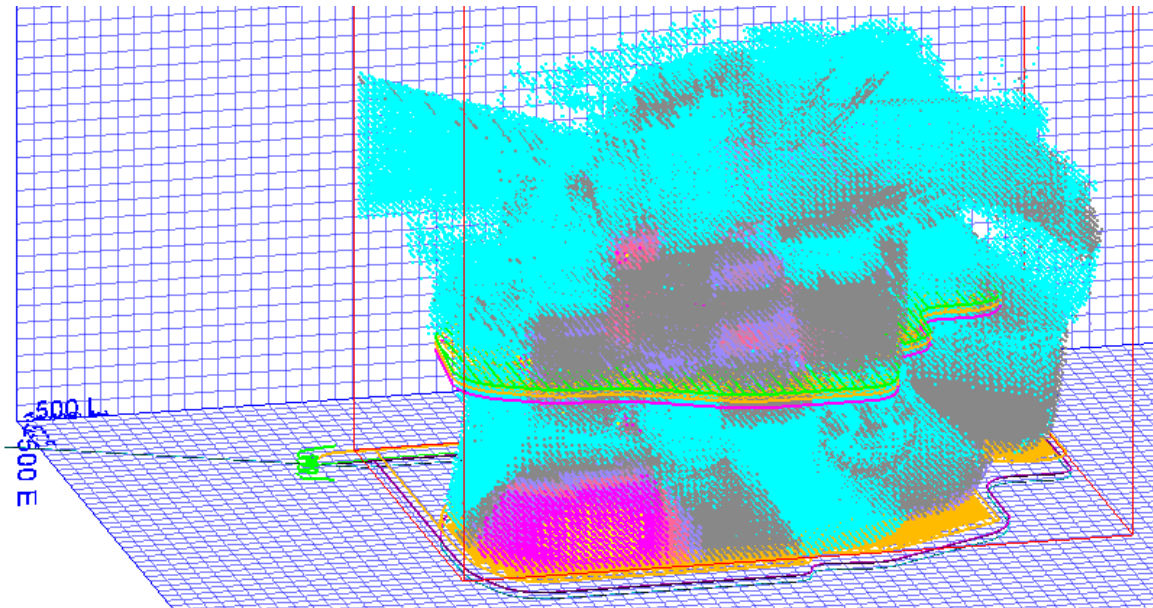




Universidad de Concepción

Estrategia y economía en minería subterránea masiva: Block Caving en Chile



M.Sc. René Gómez Puigpinos (regomez@udec.cl)



Agenda



1. Introducción al Block Caving
2. BC en Chile
3. Planificación y estrategias
4. Desafíos presentes y futuros



1. Introducción al Block Caving



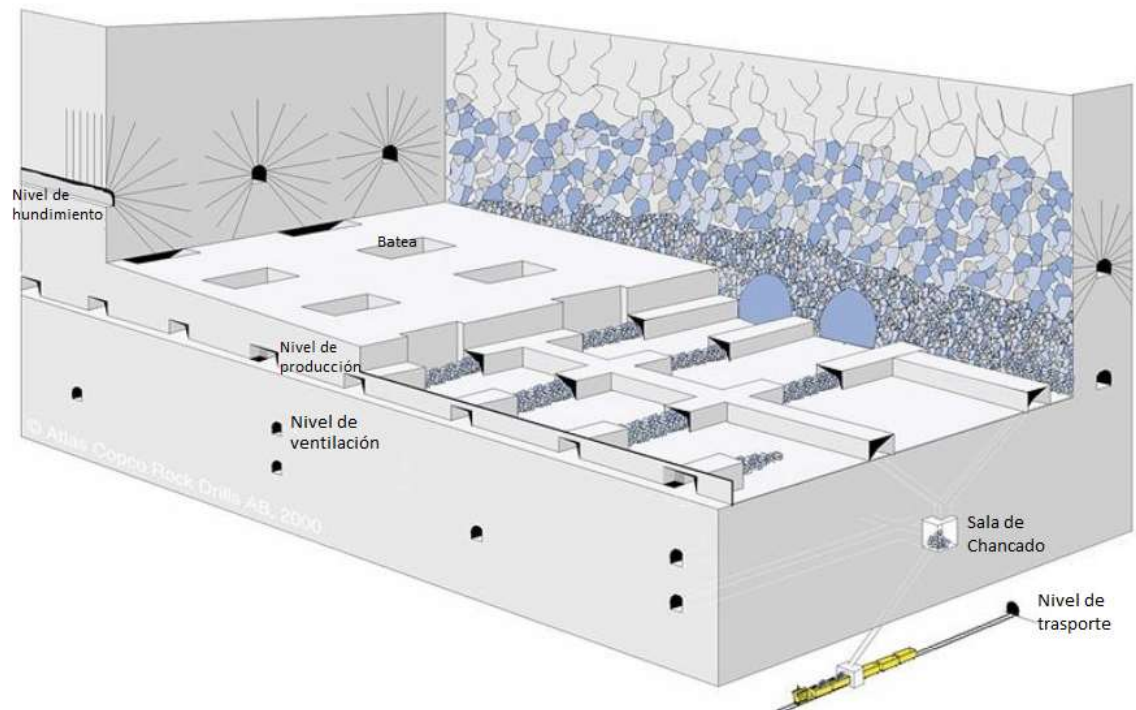
Método subterráneo masivo de alta productividad (5.000 a 48.000 tpd por sector).

Selectividad limitada, requiere de un nivel de hundimiento o socavación, producción, transporte y ventilación. Estructuras mineras alejadas de la zona de subsidencia.

En Chile operan actualmente 3 operaciones con este método o su variante Panel Caving.

Riesgos potenciales:

- Geotécnicos (estallidos de roca, de barro, convergencia, etc);
- de manejo de materiales (fragmentación, sistemas de traspaso).





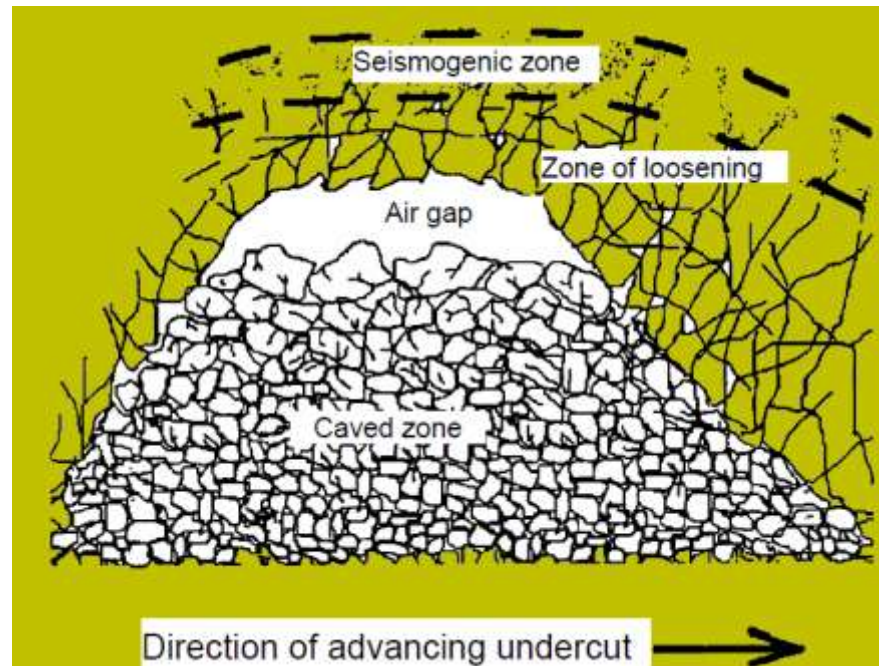
1. Introducción al Block Caving



Mecanismos

Al iniciarse la explotación, comienza el hundimiento natural de macizo rocoso hasta propagarse el quiebre a la superficie. En la dinámica del proceso ocurre:

- Desconfinamiento o caving gravitacional, inducido por discontinuidades.
- Stress Caving, el cual envuelve falla de corte en discontinuidades y fracturamiento de roca.
- Hundimiento y subsidencia





1. Introducción al Block Caving



Características relevantes de la explotación

- Costo operación (5-10 US\$/ton)
- Costo Capital (16.000 US\$/ton)
- Dilución cercana al 20% y Recuperación minera 70-90%

Yacimientos

Geología: Pipas, Pórfidos, mineralización masiva

Geometría: Yacimientos que pueden sustentar un gran área

Macizo rocoso: débil para iniciar caving y lo suficientemente resistente para mantener el nivel de producción

Patrón estructural/esfuerzos favorable para propagar el caving y producir buena fragmentación

Baja variabilidad en leyes

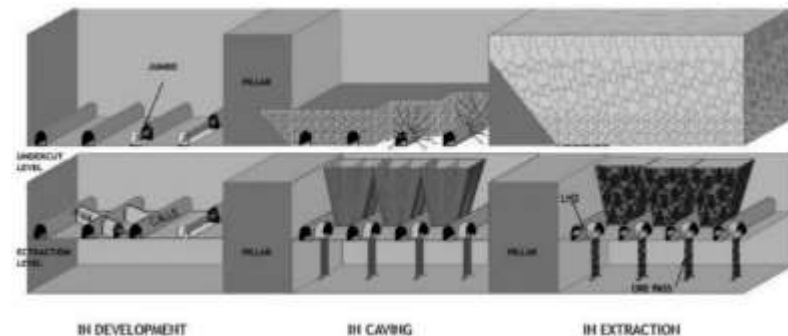
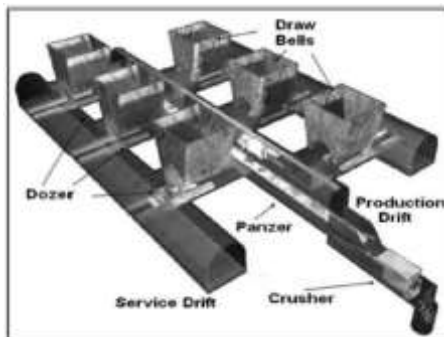
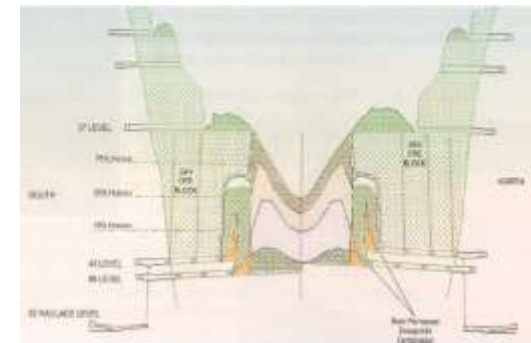
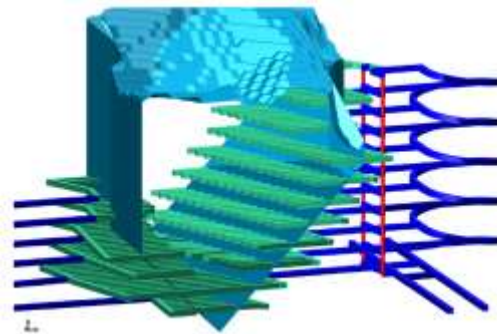
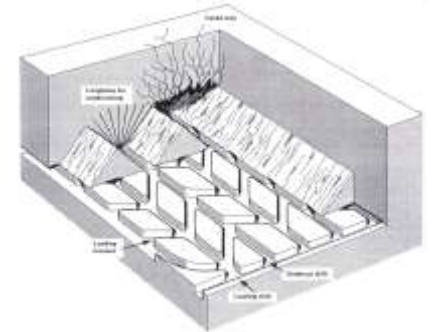
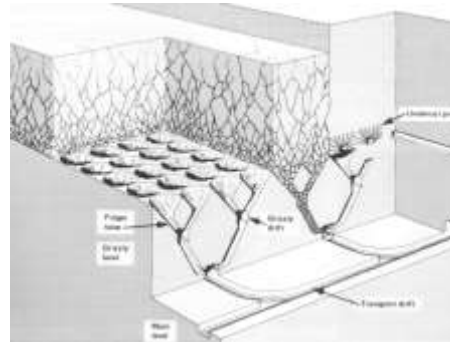


1. Introducción al Block Caving



Variantes

- Block caving
- Panel caving
- Block/panel caving inclinado
- Front caving
- Minería continua
- Macro Bloques





1. Introducción al Block Caving

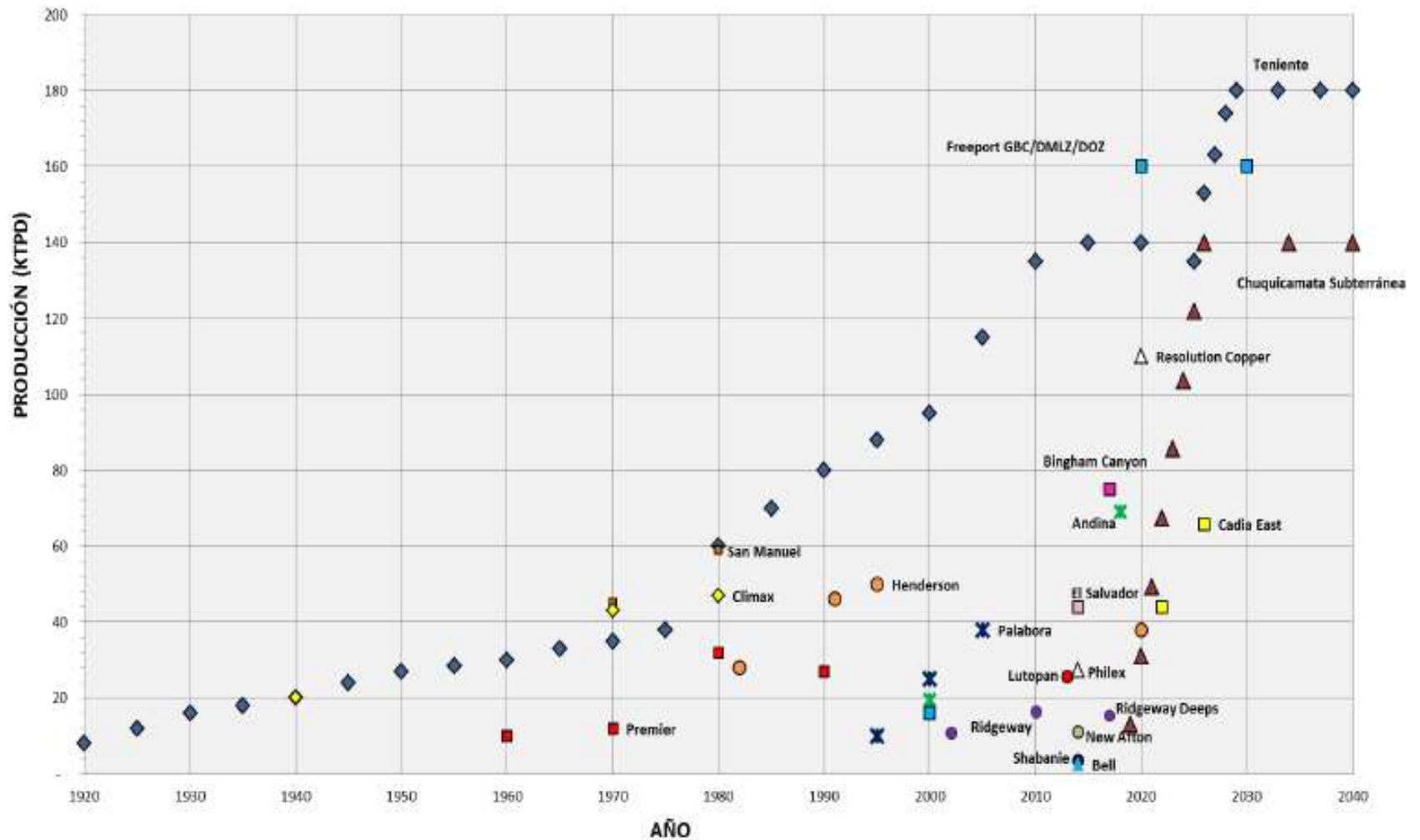




1. Introducción al Block Caving



Evolución ritmos de explotación

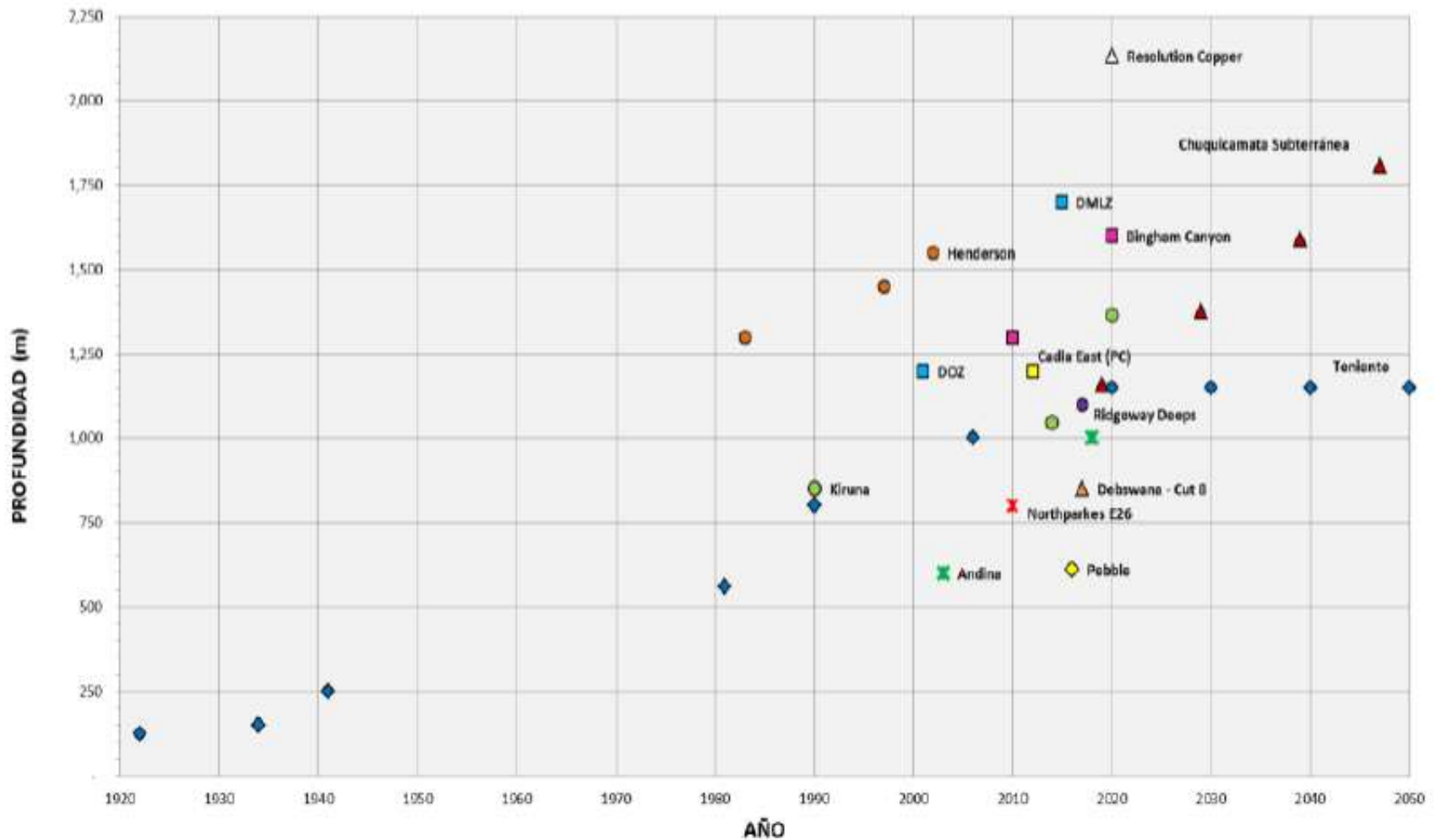




1. Introducción al Block Caving



Evolución profundización

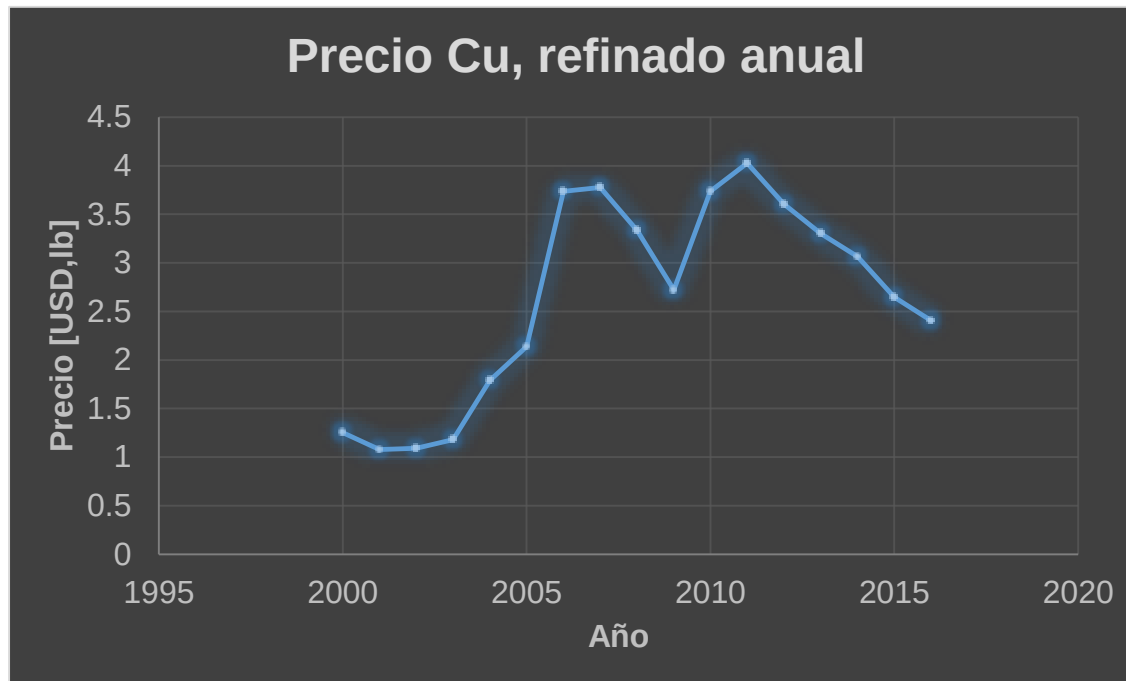




2. Block Caving en Chile



- Minería de cobre yacimientos cercanos a leyes de 0,7 – 0,9% Cu.
- Minerales de Cu: Calcopirita, Cuprita, Covelina, Calcosina, Bornita, Azurita, Malaquita, Crisocola, Chalcantita.
- Productos: Cátodos de Cu 99,99% ley, Concentrados de cobre 30%.
- Precio de Cu: 3,14 USD/lb; Costo(C1) 1,4 USD/lb.

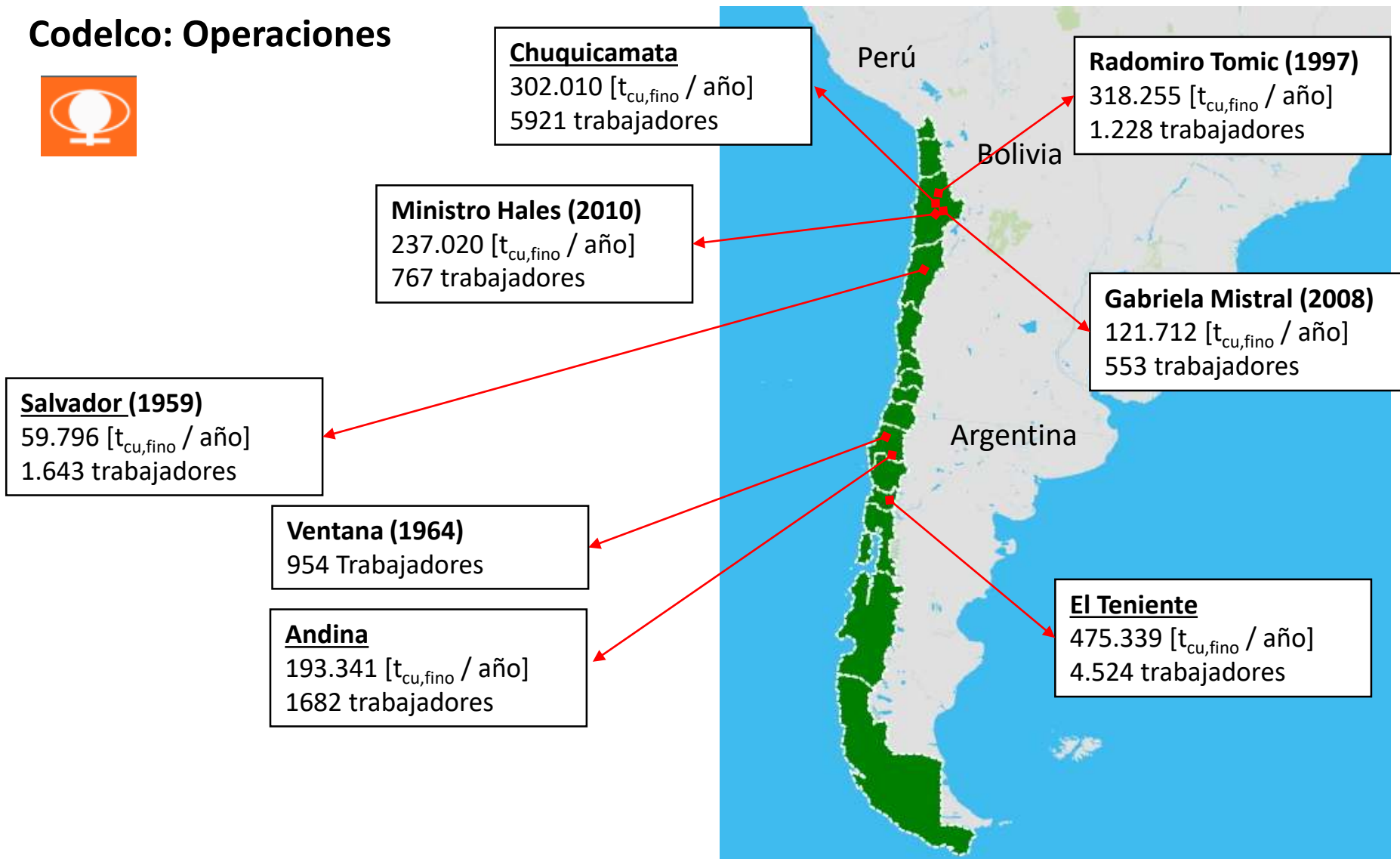




2. Block Caving en Chile



Codelco: Operaciones

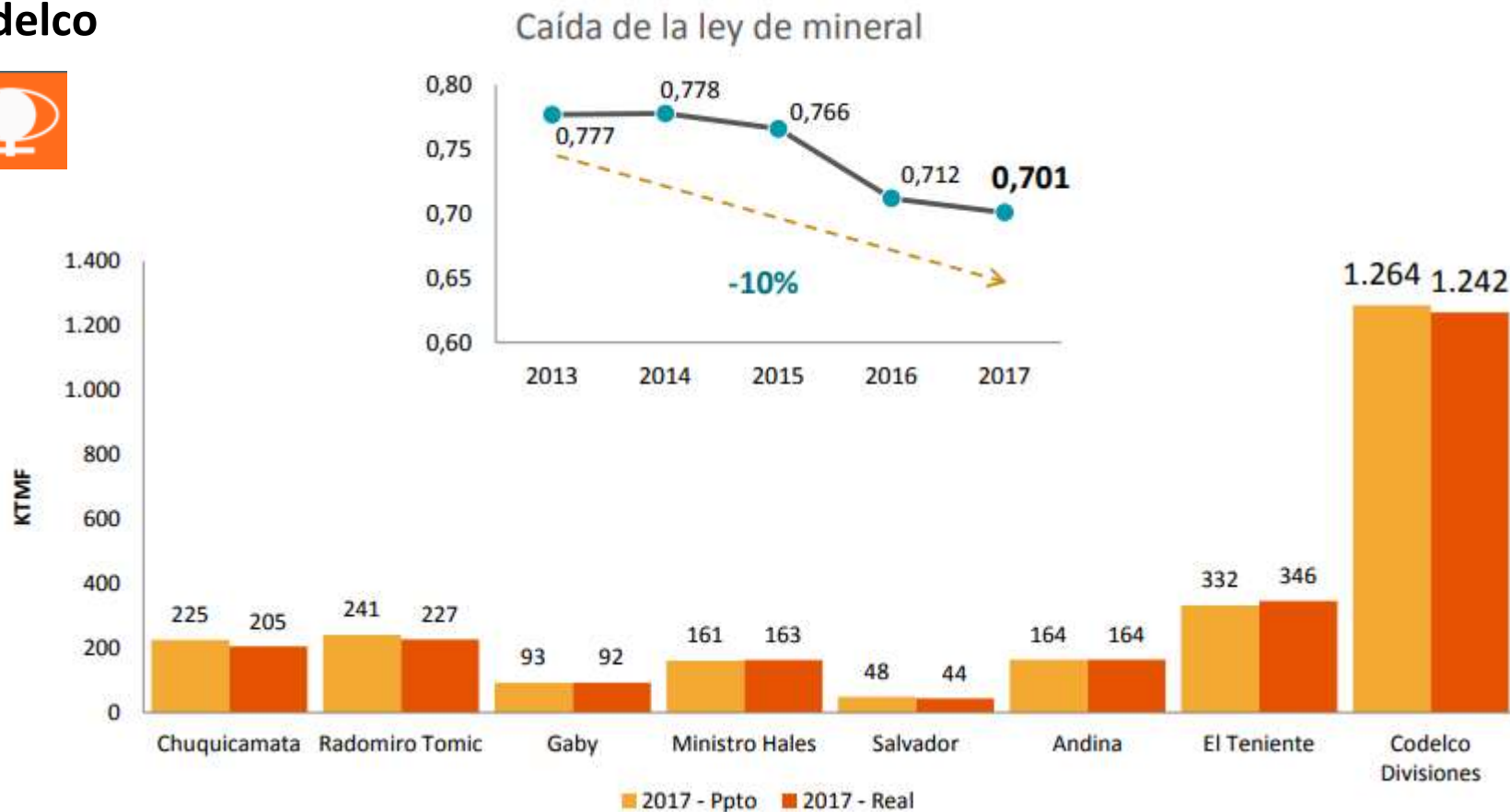




2. Block Caving en Chile



Codelco



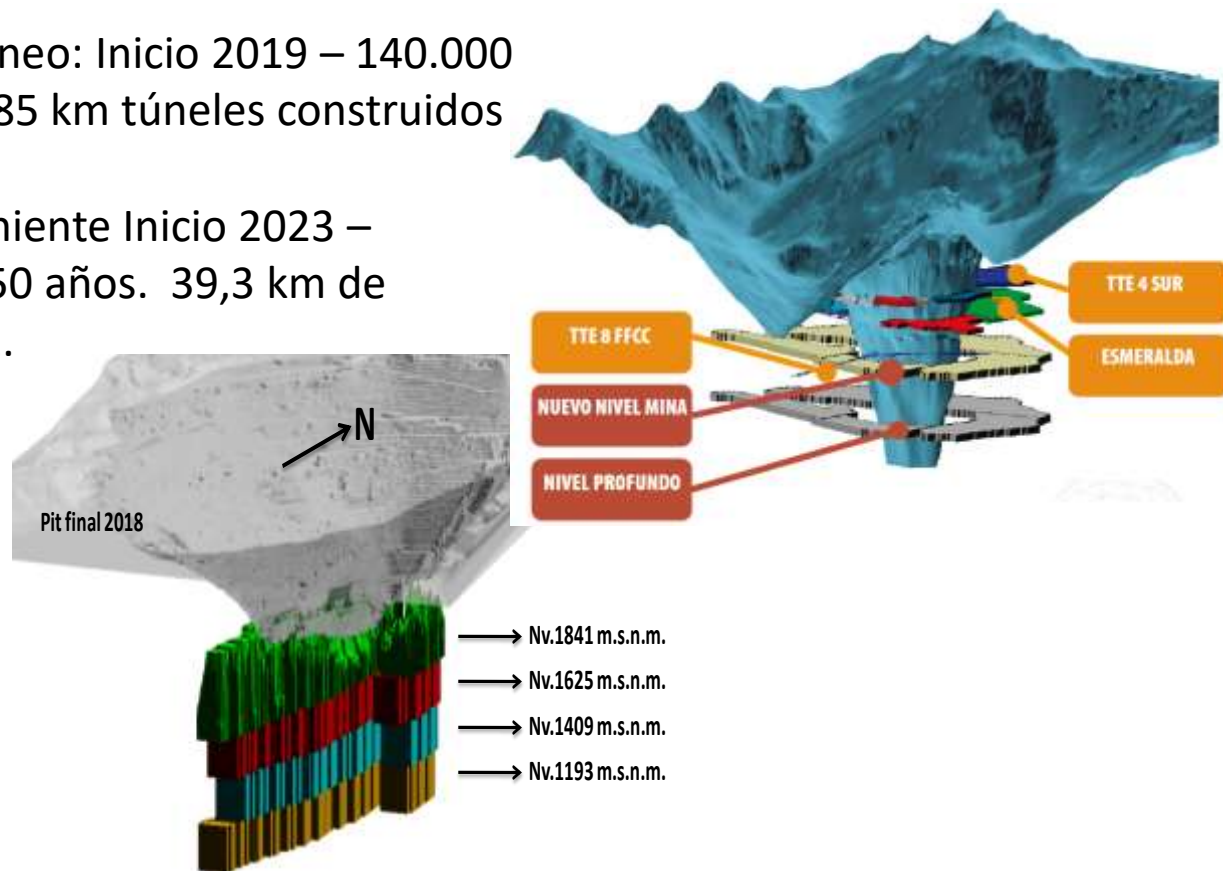


2. Block Caving en Chile



Codelco: Proyectos

- 2016 – 2020: 18.000 [MUSD] → Asegurar producción hasta el 2030 (77%)
- Proyecto subterráneos:
 - Chuquicamata subterráneo: Inicio 2019 – 140.000 [tpd] en régimen, 40 años. 85 km túneles construidos de 140 km.
 - Nuevo Nivel Mina El Teniente Inicio 2023 – 137.000 [tpd] en régimen, 50 años. 39,3 km de túneles construidos de 80,2.



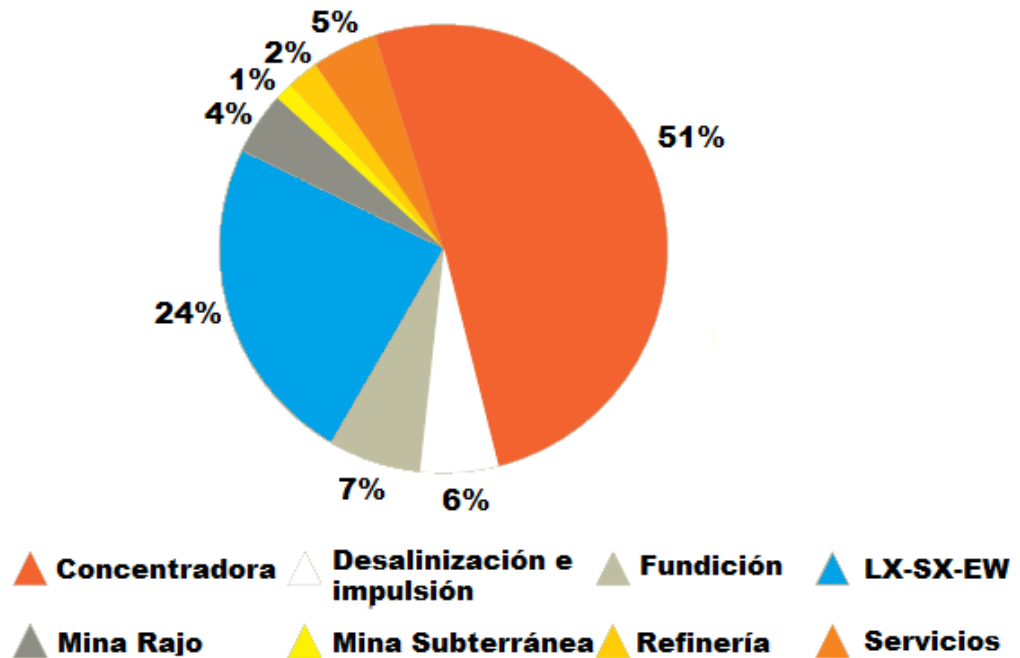


2. Block Caving en Chile



Energía: Costo

- Chile 0,15 USD/kWh
- Perú 0,12 USD/kWh
- España 0,26 USD/kWh
- China 0,08 USD/kWh

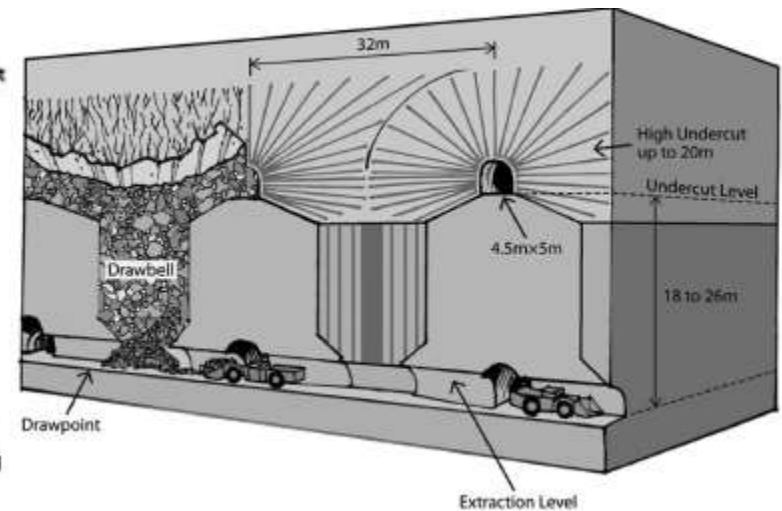
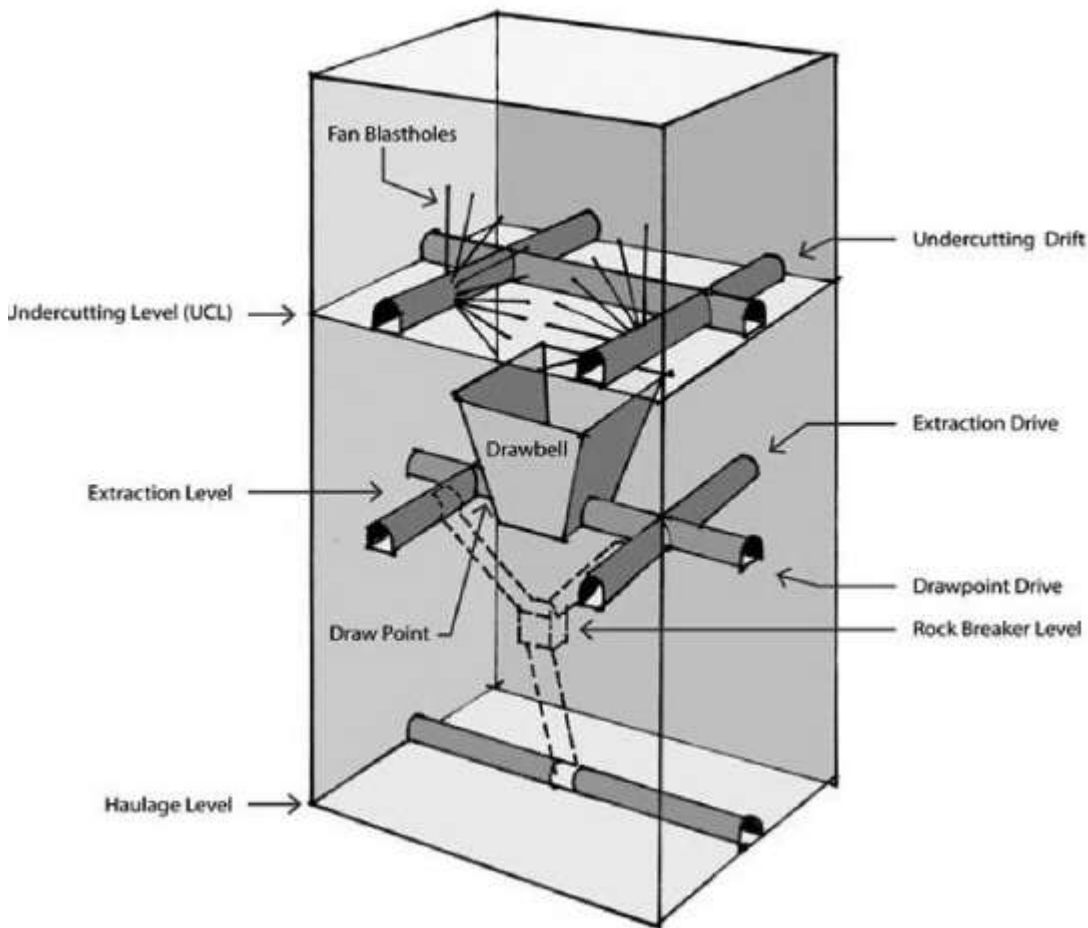




3. Planificación y estrategias en BC



Sistema de manejo de materiales





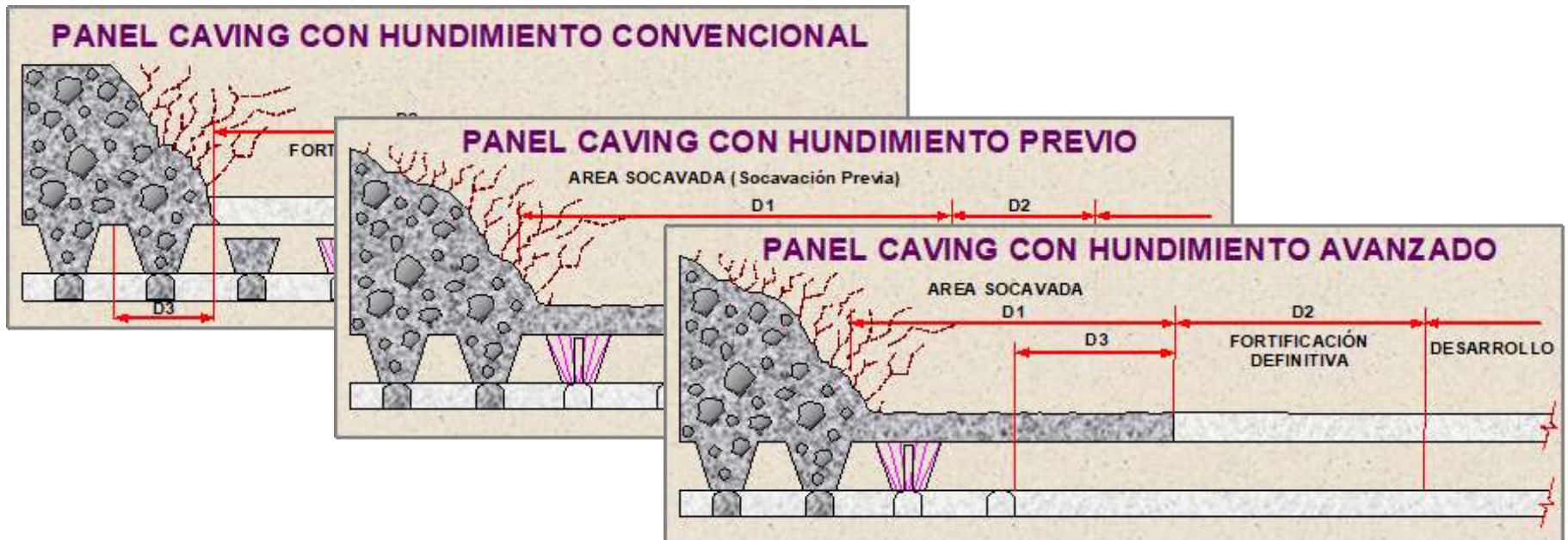
3. Planificación y estrategias en BC



Nivel de Hundimiento

Inicia propagación del caving u hundimiento, tras realizar tronadura en la base del mineral.

- Estrategias de socavación (Convencional, previo, avanzado)
- Variantes (alta, baja, “crinkle cut”)





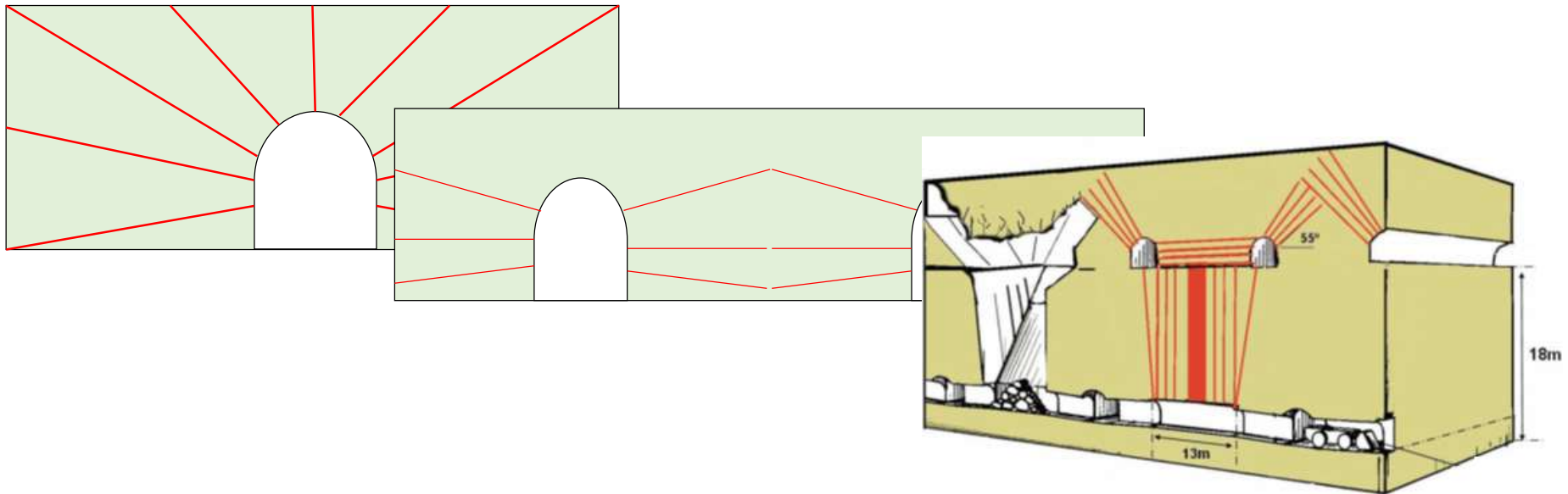
3. Planificación y estrategias en BC



Nivel de Hundimiento

Inicia propagación del *caving* o hundimiento, tras realizar tronadura en la base del mineral.

- Estrategias de socavación (Convencional, previo, avanzado)
- Variantes (alta, baja, “crinkle cut”)



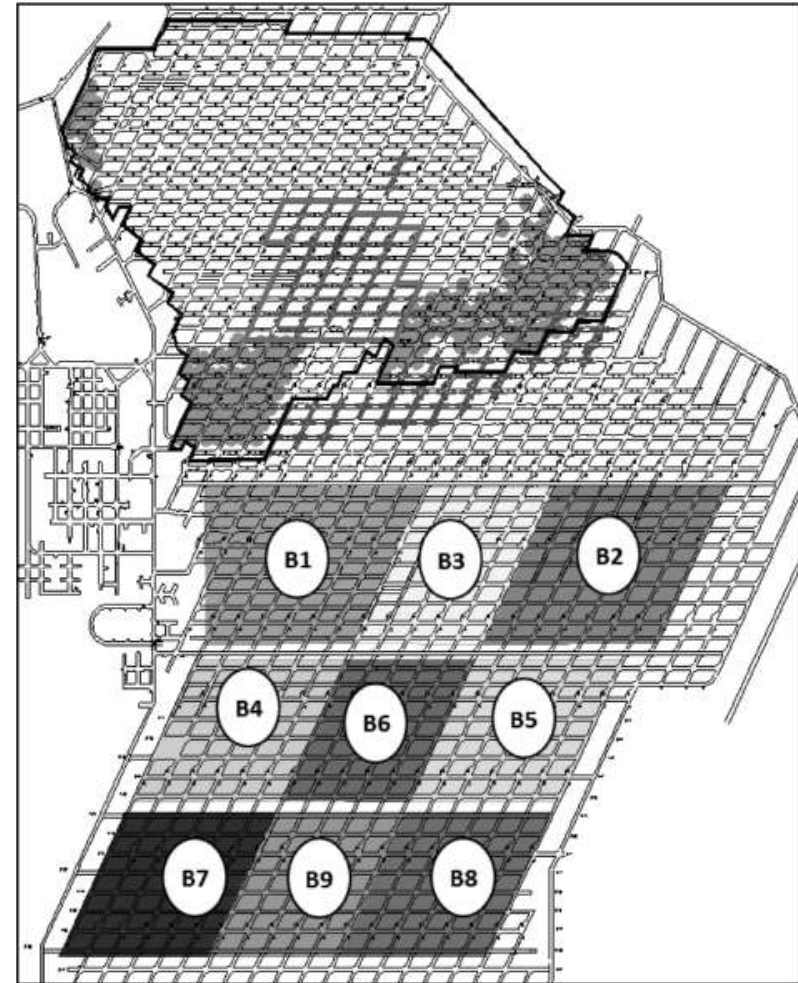
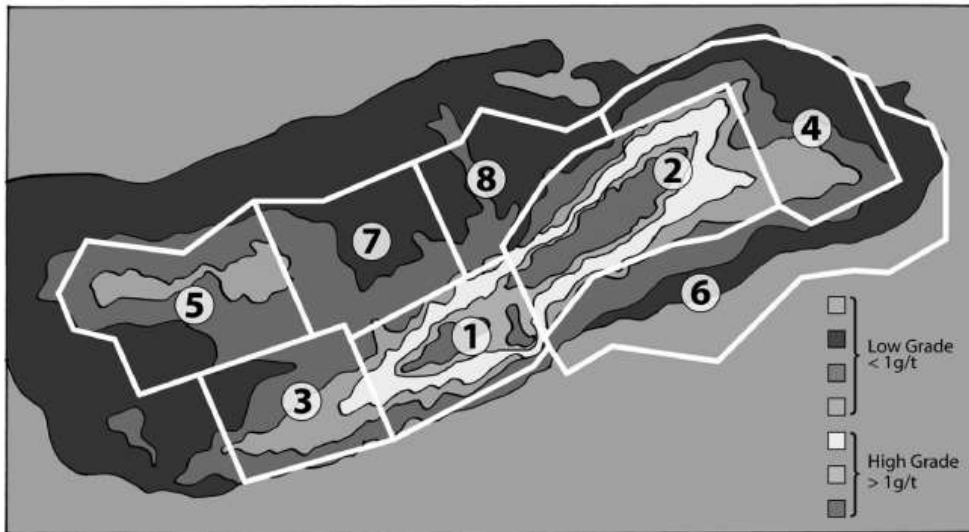


3. Planificación y estrategias en BC



Nivel de producción: Planificación largo plazo

- Velocidad de hundimiento (en planta) 2,000 - 4,000 m²/mes
- Velocidad de extracción aprox. 0,8 t/m²/d (en régimen)

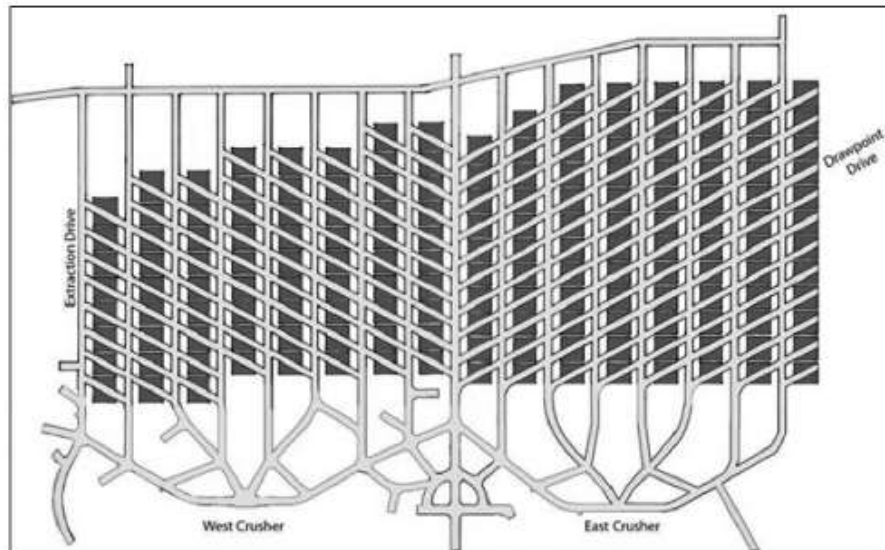




3. Planificación y estrategias en BC

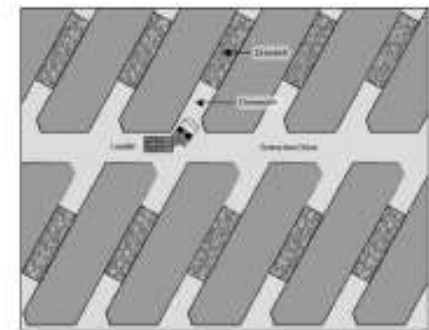
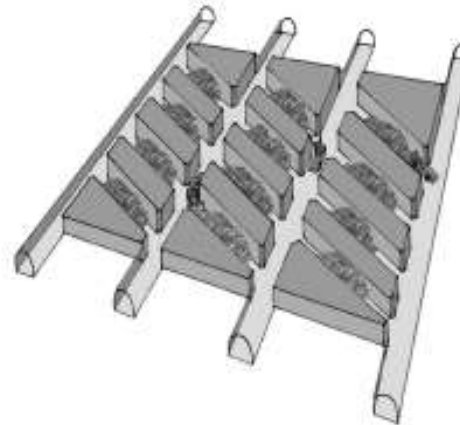


Nivel de producción (extracción)



LHD:

- Capacidades: 3,6 a 20 [ton]
- Potencias: 63 a 336 [kW]
- Modalidades:
 - Eléctricos/Diesel
 - Telecomandados/Manuales





3. Planificación y estrategias en BC



Nivel de producción: Problemas operacionales

- Colgadas, Sobretamaños
- Cierre de puntos (colpasos, estallidos de barro, estallidos de aire)
- Control de tiraje, entrada de dilución

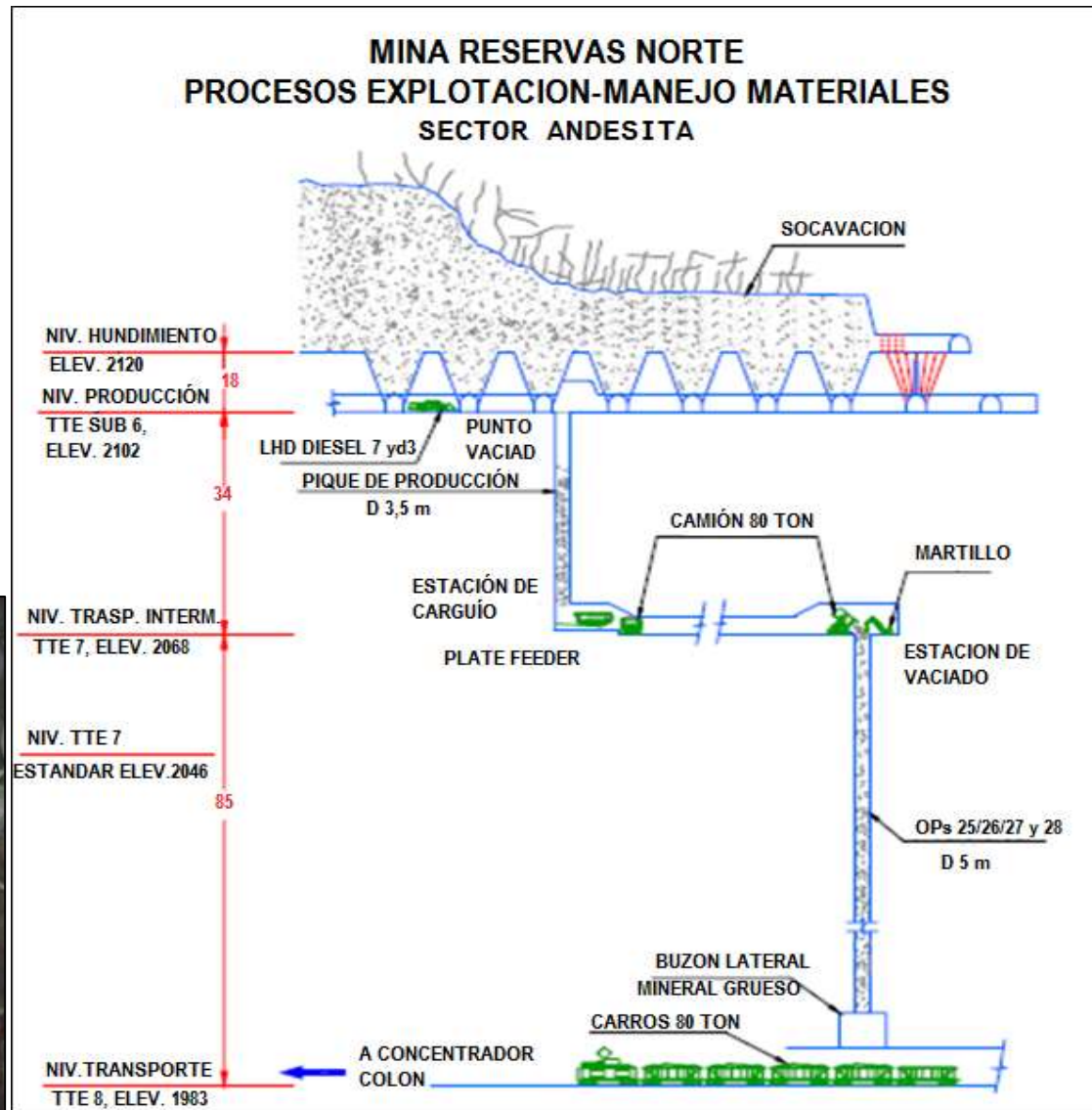
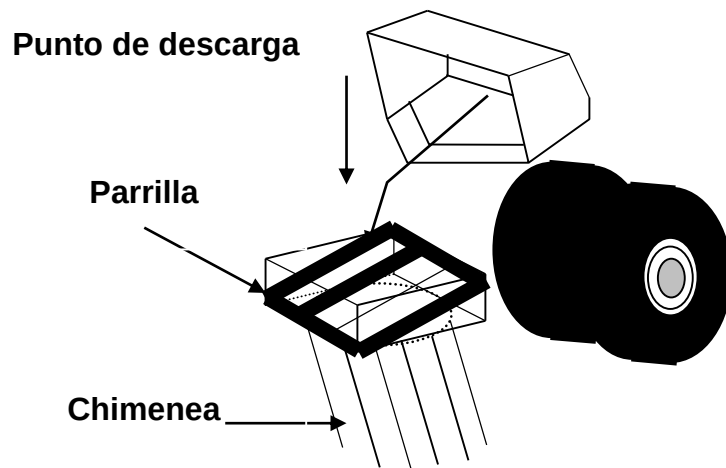




3. Planificación y estrategias en BC

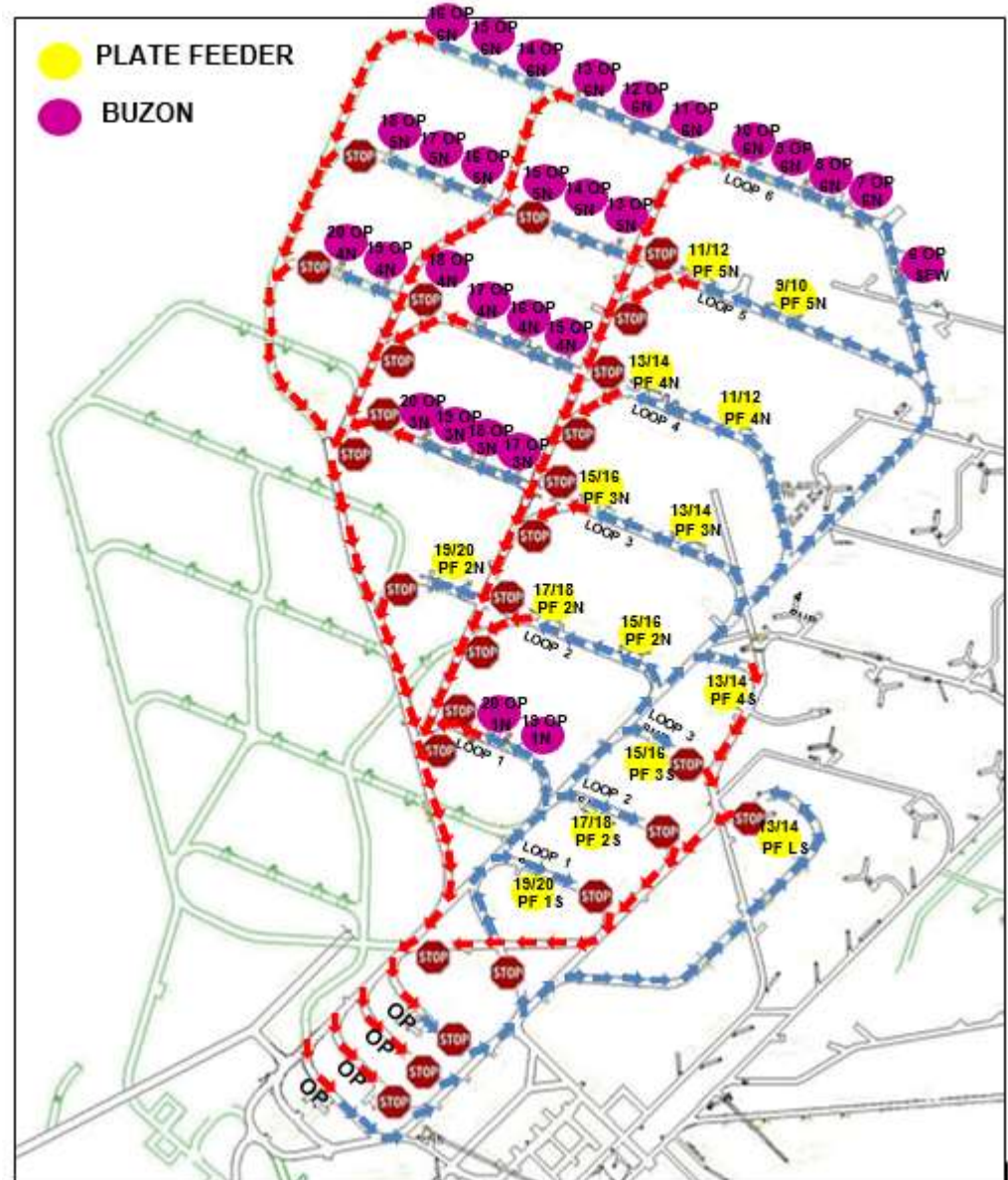


Nivel de transporte





A close-up photograph of a large, rusted metal structure, likely a ship's hull. The metal is heavily corroded, with large areas of orange-brown rust. A thick, curved metal rod or pipe is visible, passing through the structure. In the background, a yellow metal framework, possibly a staircase or walkway, is visible against a dark background. The overall scene suggests a state of significant decay and structural damage.



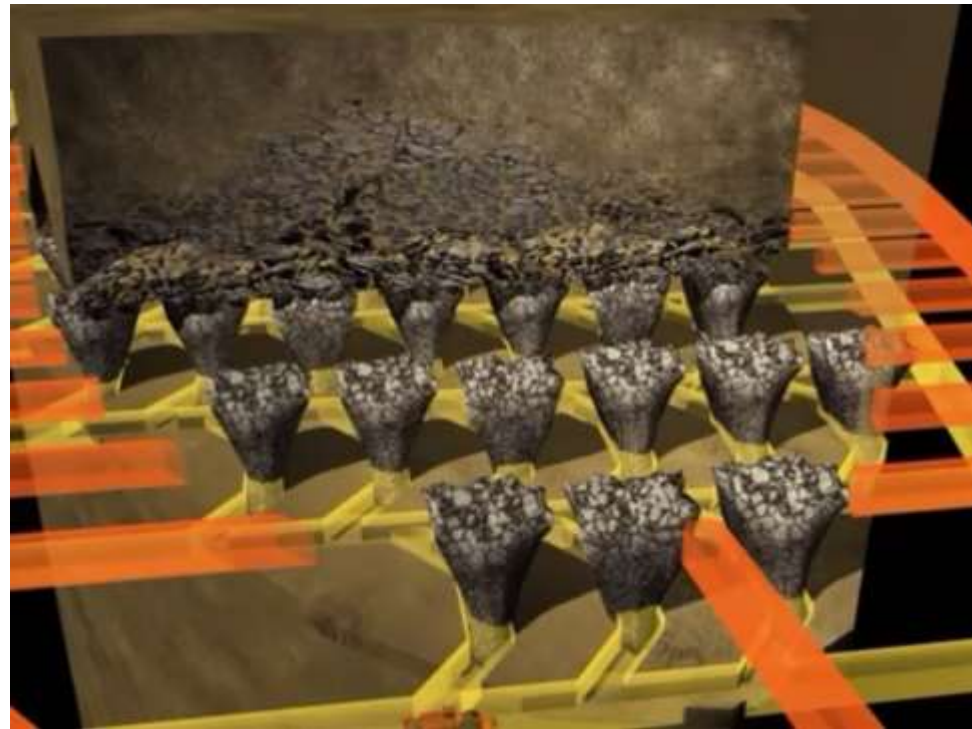


4. Desafíos presentes y futuros



Los desafíos técnico-ingenieriles de métodos de caving están relacionados básicamente con las características geomecánicas de la roca primaria:

- El quiebre en grandes bloques, o colpas, que deben ser descolgados y reducidos en los mismos puntos de extracción.
- Grandes cantidades de energía de deformación antes de fallar, bajo condiciones de esfuerzos moderados y alta resistencia del macizo.
- Condición de estabilidad que no permita el colapso de la zona socavada.
- La velocidad de propagación del hundimiento en roca primaria es baja
- Desde el punto de vista económico, existen varios factores que encarecen el proceso de producción, es necesario mantener un gran número de puntos de extracción activos





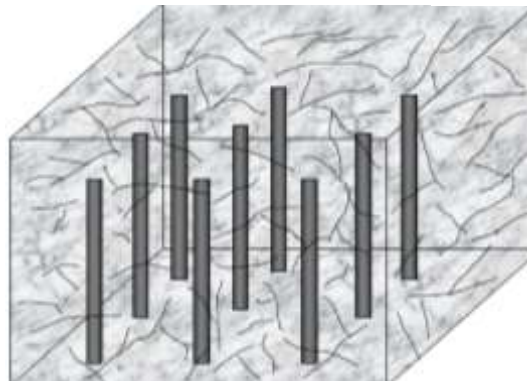
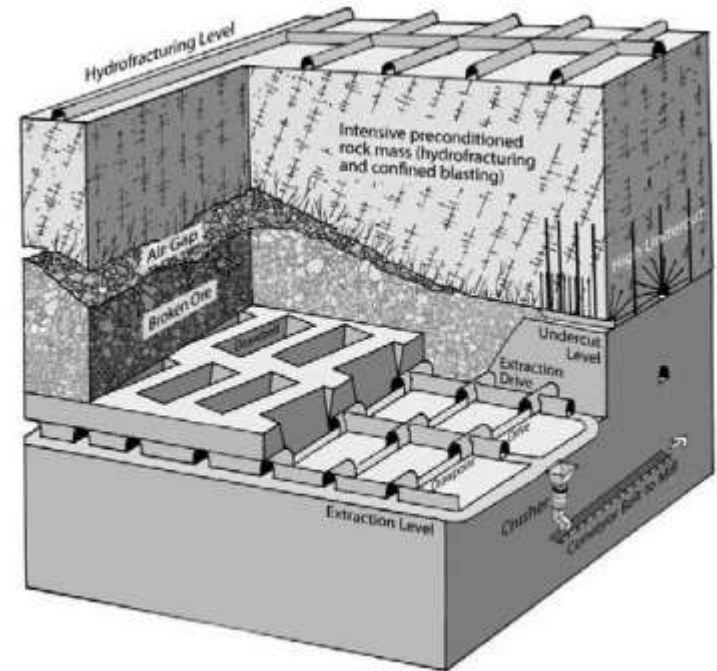
4. Desafíos presentes y futuros



Escenario actual/futuro: Mayores profundidades, menos leyes y roca mas competente

Pre-acondicionamiento (PA) del macizo rocoso para favorecer su hundimiento

Métodos de PA: Explosivos, Fracturamiento hidráulico y mixto

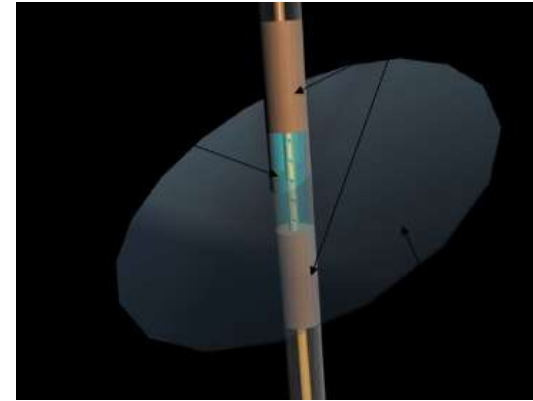




4. Desafíos presentes y futuros



Fracturamiento Hidráulico (FH); consiste en presurizar un tramo de una perforación al inyectar un fluido a presión, comúnmente agua, para iniciar una fractura de tensión en las paredes sanas de la perforación, o alternativamente extender una fractura preexistente, y así propagarla hacia el interior del macizo rocoso. De este modo el FH aumenta la conectividad entre fracturas y el deslizamiento de estructuras existentes, disminuyendo a la vez la resistencia al corte de la roca.



Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE); utiliza explosivos para producir una colisión de ondas de esfuerzos dinámico, asunto que en la actualidad es posible debido a las tecnologías de detonación electrónica disponibles en el mercado. Con el fin de debilitar el macizo rocoso.

PA mixto; consiste en la combinación de ambos métodos (FH y DDE), ejecutándose primero el FH y posteriormente el DDE.

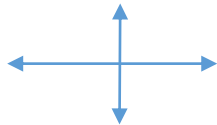
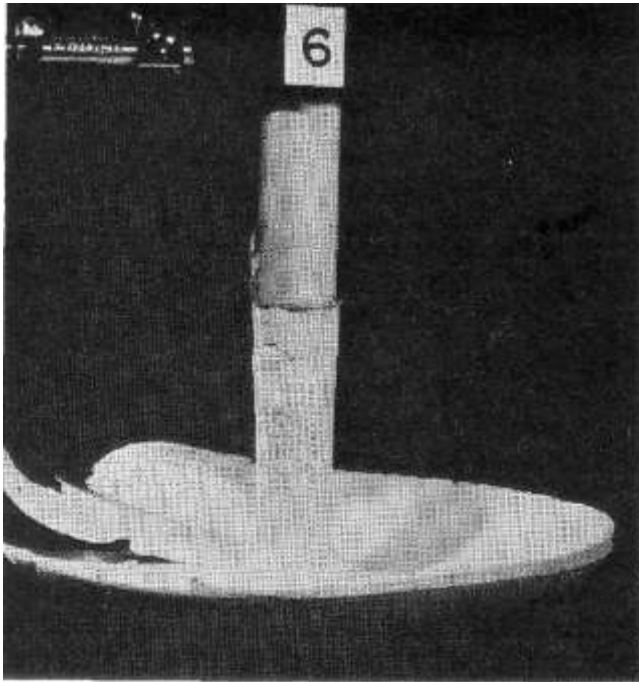


4. Desafíos presentes y futuros

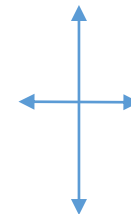
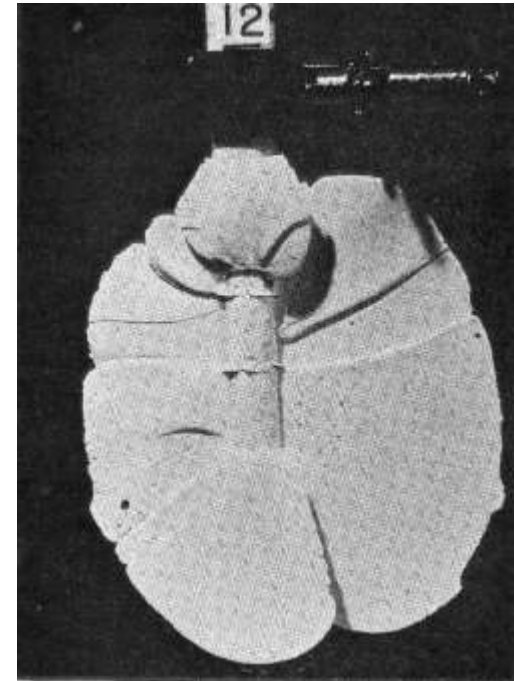


Campo de esfuerzos

$$\sigma_H > \sigma_V$$



$$\sigma_V > \sigma_H$$

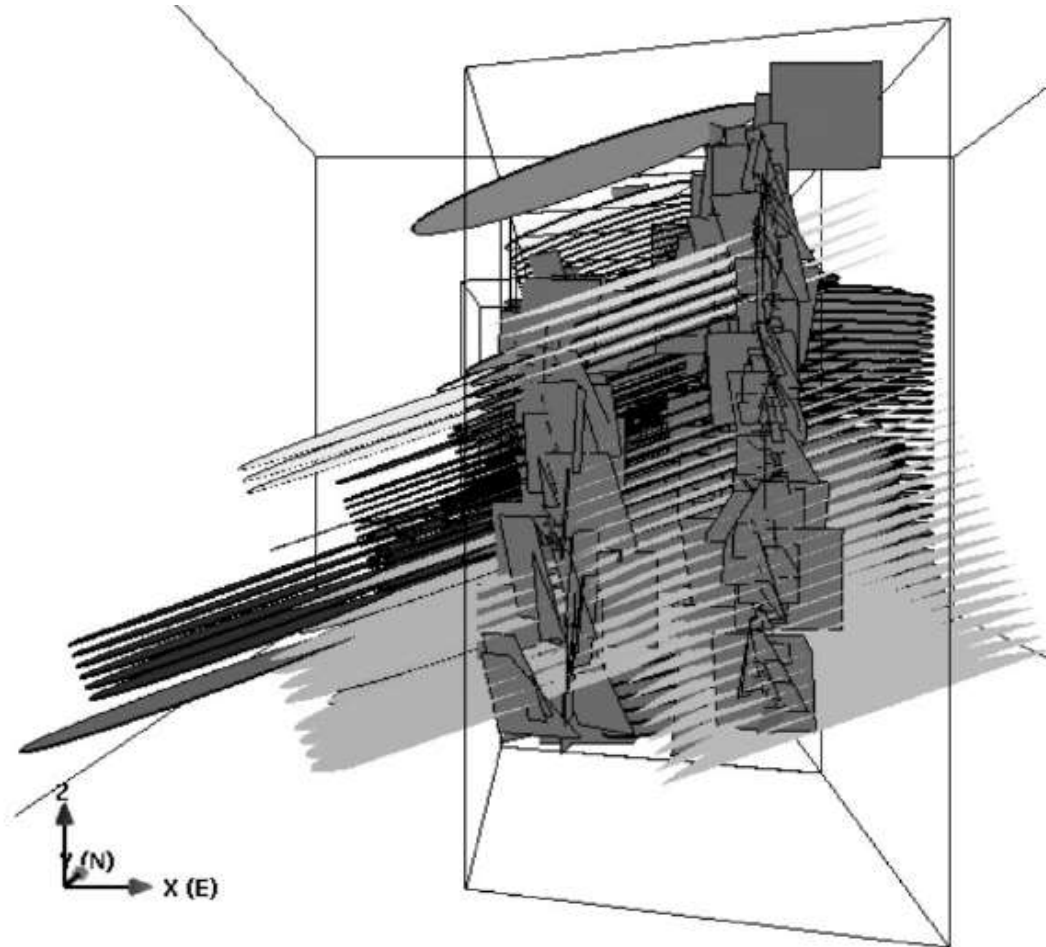




4. Pre-acondicionamiento



Simulación de proyección de fracturas





4. Pre-acondicionamiento



Variables afectadas por el PA

- Hundibilidad – RH
- Propagación del hundimiento y velocidad de extracción
- Tasa de incorporación de área
- Fragmentación obtenida en los Puntos de Extracción
- Banda de protección por abutment stress
- Criterios de fortificación en Minería Subterránea



4. Pre-acondicionamiento



Aplicación de PA en operaciones de Codelco

El PA fue utilizado por primera vez en Rio Blanco mediante DDE, generando una mejor hundibilidad y fragmentación del macizo rocoso. También posteriormente se probó PA mixto (DDE y FH) en División Salvador.

División	Andina	Salvador	El Teniente
Periodo	2004-2006	2001-2006	2004-2006
Sector	III Panel (área 11)	Inca Central Oeste	Diablo Regimiento
Técnica de PA	Mixta	Mixta	FH
Área (m2)	22000	10000	10200
Altura mineral primario (m)	30-90	100	150
Nº Pozos DEE tronados	49	14	-
Nº Pozos con FH	9	9	6
Diámetro pozos DEE	5 3/4"	6 1/2"	-
Diámetro pozos FH	HQ (96 mm)	HQ (96 mm)	HQ (96 mm)
Columna de emulsión (m)	15-75	80	
Longitud de pozos (m)	30-90	100	100-140



4. Pre-acondicionamiento



Aplicación de PA en operaciones de Codelco

		División		
		Andina		El Teniente
Año Aplicación Industrial		2007	2008	2007
Periodo de Medición		2007-2010		2007-2010
Variable	Indicador	FH+DEE	FH	FH
Fragmentación	P80	-18.9%	0.0%	-2.1%
	P50	0.8%	0.0%	-8.2%
	Máxima Colpa	-17.4%	0.0%	-
Reducción Secundaria	IRS (eventos/1.000 t)	-10.8%	0.0%	57.4%
	Tonelaje entre eventos	12.1%	0.0%	-36.5%
Velocidad de Extracción	V (t/m ² /día)	-23.1%	0.0%	1.0%



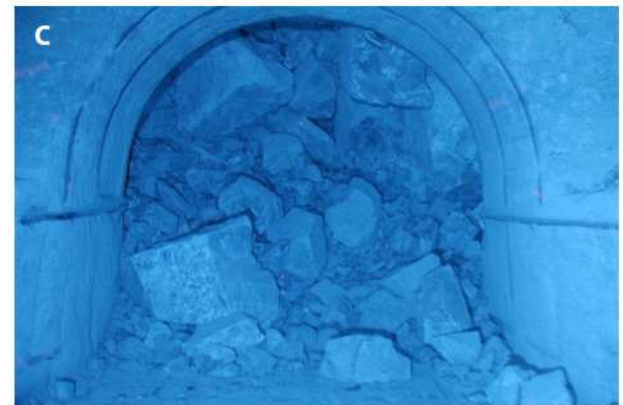
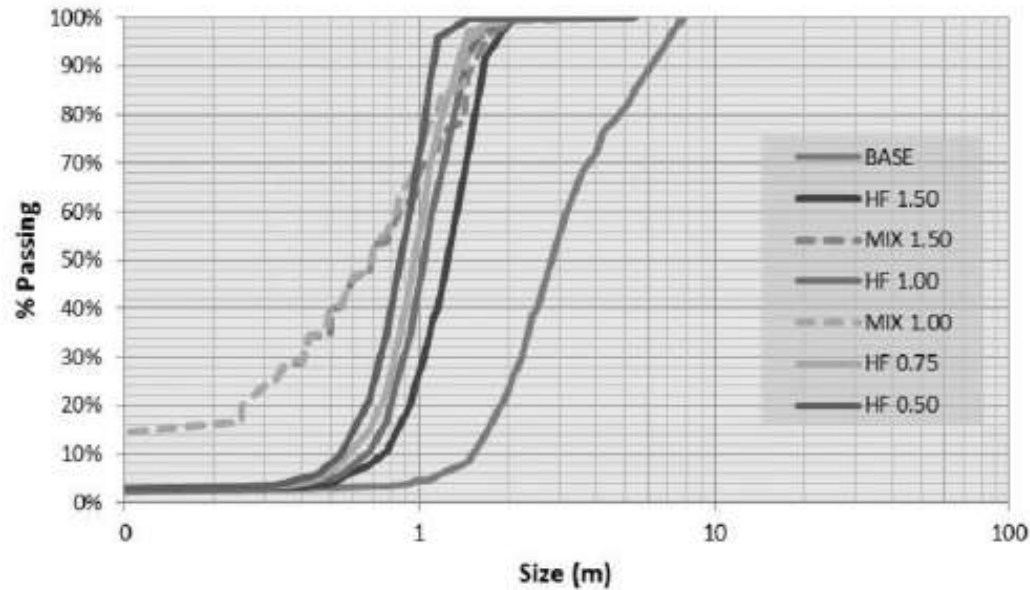
4. Pre-acondicionamiento



Beneficios

Impacto en la fragmentación: Granulometría en puntos de extracción.

Rock Size Distribution for Preconditioning Techniques





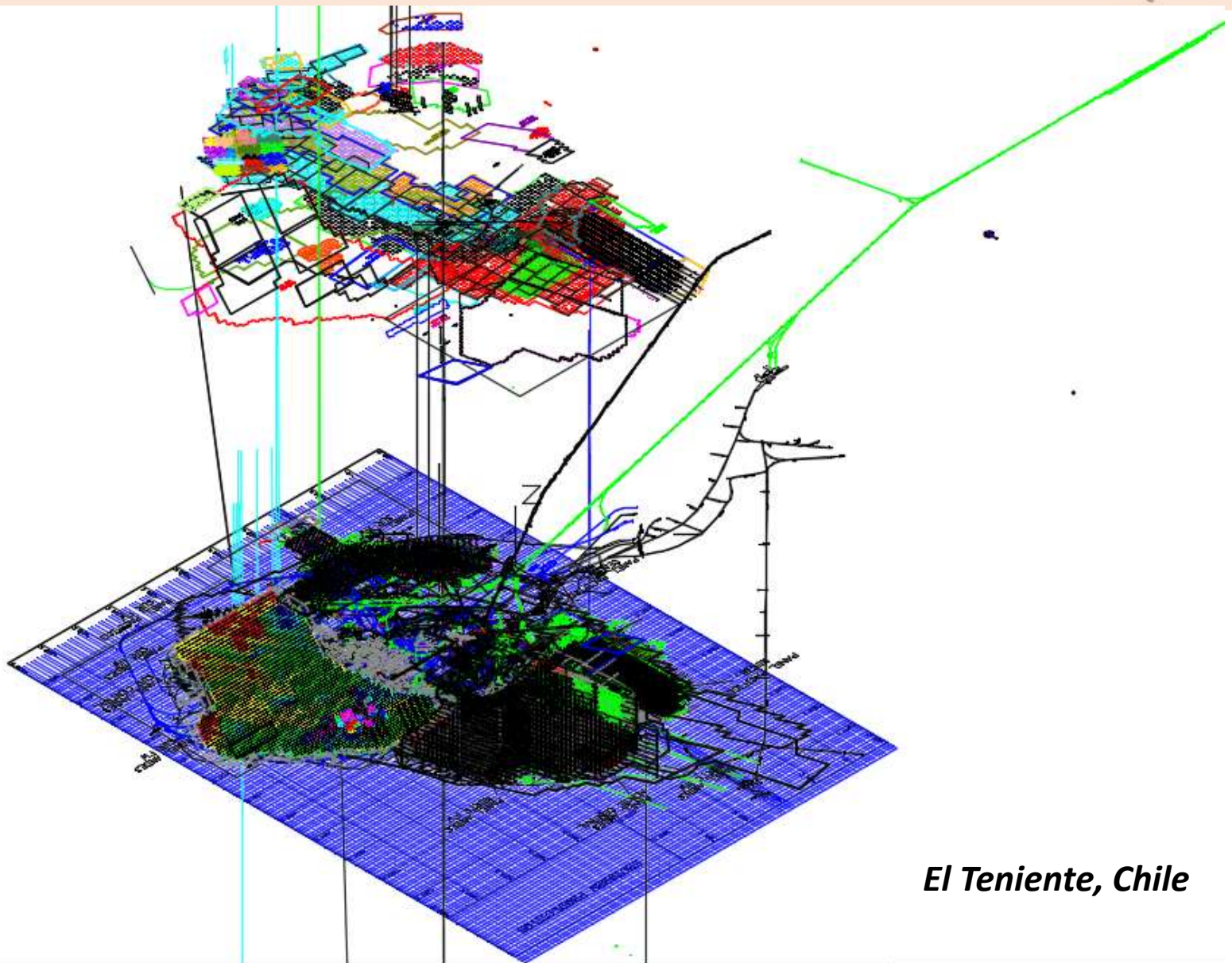
Referencias



- Griffith 1921, The phenomena of fracture and fluid in solids
- Clark 1949, A hydraulic process for increasing the productivity of wells
- Hubbert and Wills 1972, Mechanics of hydraulic fracturing
- Zhao et al. 2014, Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method
- Cochilco 2014, Factores Clave para el Desarrollo de la Minería en Chile.
- Codelco 2017, Operaciones (www.Codelco.com)
- Codelco 2017, Proyectos (www.Codelco.com)
- German Flores, 2014. Future Challenges and Why Cave Mining Must Change. Caving 2014.
- Brown, ET. 2004. Block caving geomechanics.
- Castro R, 2006. Study of the mechanisms of the gravity flow for block caving. PhD thesis, University of Queensland.
- Castro R, Gómez R and Hekmat A, 2016. Experimental quantification of hang-ups for block caving applications. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 85, pp 1-9.
- Fuentes S and Villegas F, 2014. Block caving using macro blocks. In Caving 2014.
- Kvapil R, 2004. Gravity Flow in Sublevel and Panel Caving – A common sense approach.
- Labbe, 2014. Catastro de oportunidades I&D en innovación tecnológica para minería de block/panel caving. Memoria Ing Civil Minas, Universidad de Chile.
- Laubscher D, 1994. The state of the art. International Journal of Geomechanics and Mining Sciences.
- Laubscher D, 2006. Block caving Handbook.
- Pierce M, 2009. A model of gravity flow of fragmented rock in block caving mines. PhD thesis, University of Queensland.



Muchas gracias!



El Teniente, Chile