

# Automatización e Innovaciones en Desarrollo de Tuneles y Galerías con Perforación y Tronadura



Andrzej Zablocki  
Senior Advisor

[polonia.minero@gmail.com](mailto:polonia.minero@gmail.com)

# Indice

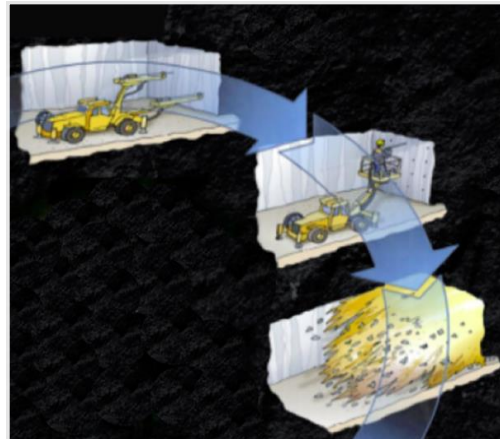
1. **Introducción**
  - 1.1 Urbanización Subterránea, Métodos y Forepolling
2. **Perforación y carguío de explosivos**
  - 2.1 Niveles de automatización
  - 2.2 Ejemplos prácticos
  - 2.3 Aceros de perforación
3. **Fortificación mecanizada**
4. **Carguío de Explosivos**
5. **Carguío y Transporte**
  - 4.1 Métodos
  - 4.2 Ejemplos prácticos
5. **VoD**
6. **Electromobilidad**
  - 6.1 Situación actual
7. **Conclusiones**
8. **Bibliografía**

# MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SUBTERRÁNEA

Excavadora, Martillo

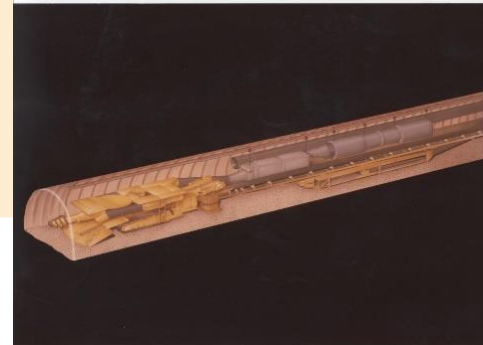


Perforación y Tronadura (D&B)



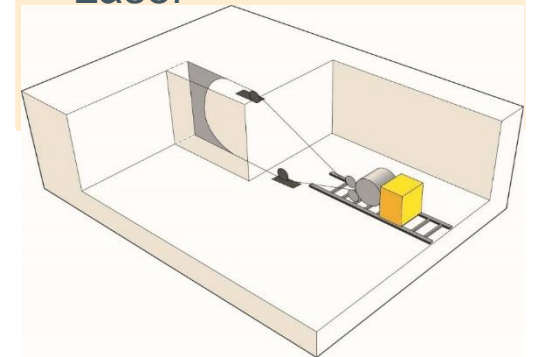
Mecánica

- Picos (RH)
- Discos (TBM, TBS)



Alternativos

- Alta presión de agua
- Microondas
- Diamantina
- Plasma,
- Láser



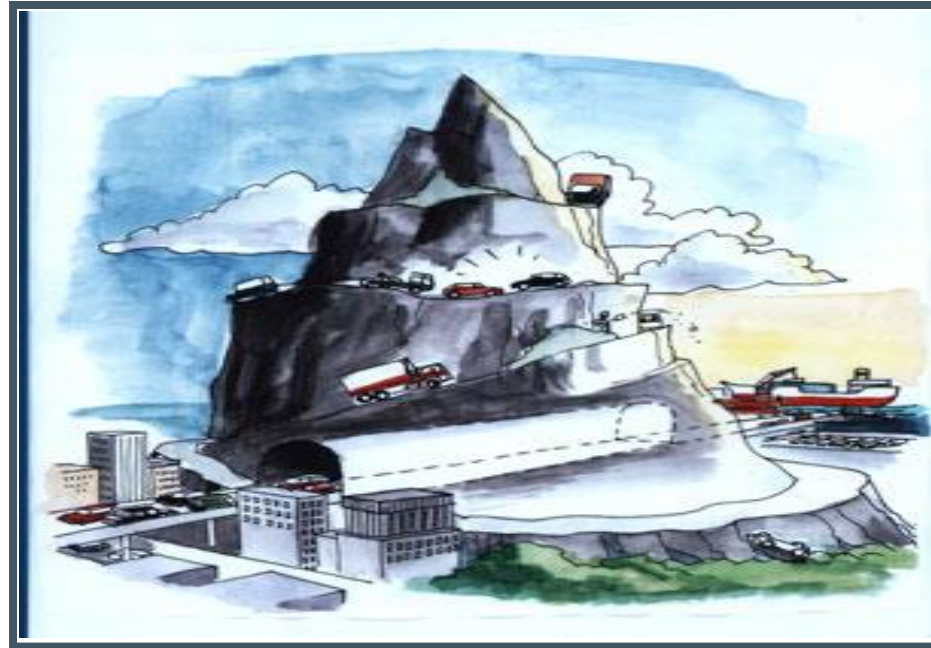
# Túneles (Galerías) Mineros vs. Tuneles/Obras Civiles

## Algunas Consideraciones Iniciales

Minería	Construcción (Obras Civiles)
<p>Vida Útil = Según la producción existente.</p> <p>Para los mineros las metas de producción son medidas en toneladas o m3.</p>	<p>Vida Útil = Permanente</p> <p>Avanzar con el desarrollo del túnel tan rápido como sea posible</p> <p>Eliminando tiempos perdidos en la frente</p>
<p>Excavar las toneladas a un costo más bajo como sea posible.</p>	<p>Cumplir con los requerimientos de diseño.</p>
<p>Minimizar la dilución del mineral.</p>	<p>Tiempo de ejecución y costos están fuertemente relacionados. (Tiempo puede representar 70% del costo total)</p>
<p>Asegurar una alta utilización de los equipos.</p>	<p>La utilización de los equipos es una prioridad secundaria.</p> <p>No así disponibilidad mecánica.</p>
<p>Cumplir con las normas de seguridad y medio ambiente.</p>	<p>Cumplir con las normas de seguridad y medio ambiente.</p>

## URBANIZACIÓN SUBTERRANEA

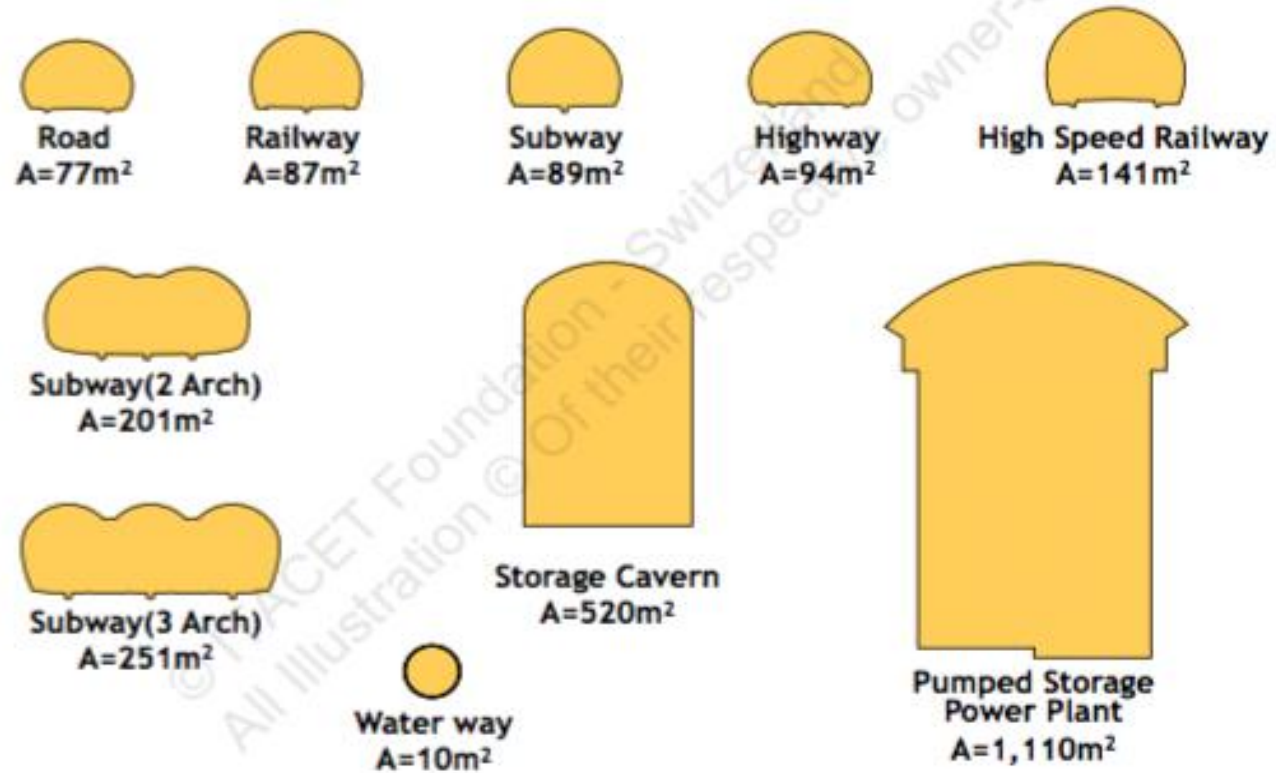
“Además de aliviar la congestión en la ciudad, se considera que el túnel tiene un gran valor ambiental ya que evitará que la ruta se encamine por un área de belleza excepcional”



Filosofía Noruega (T&T 2007)

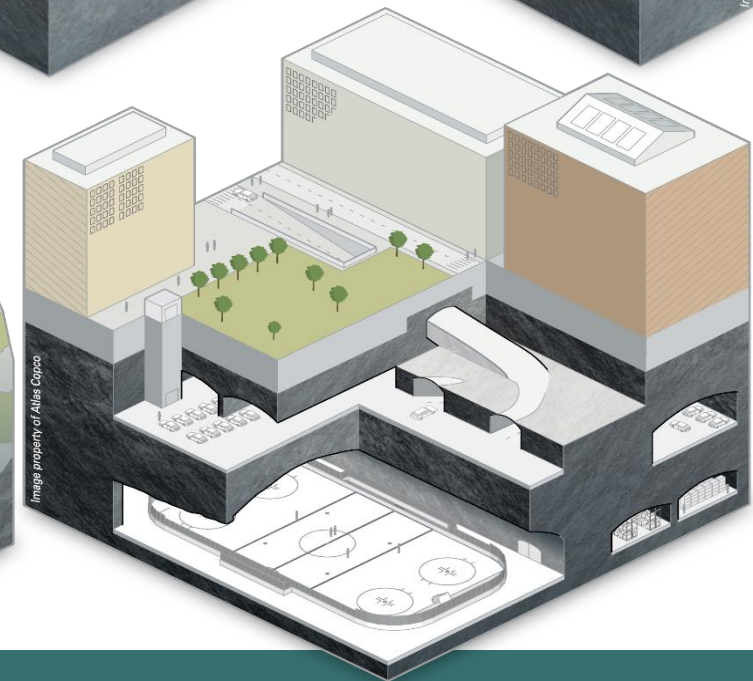
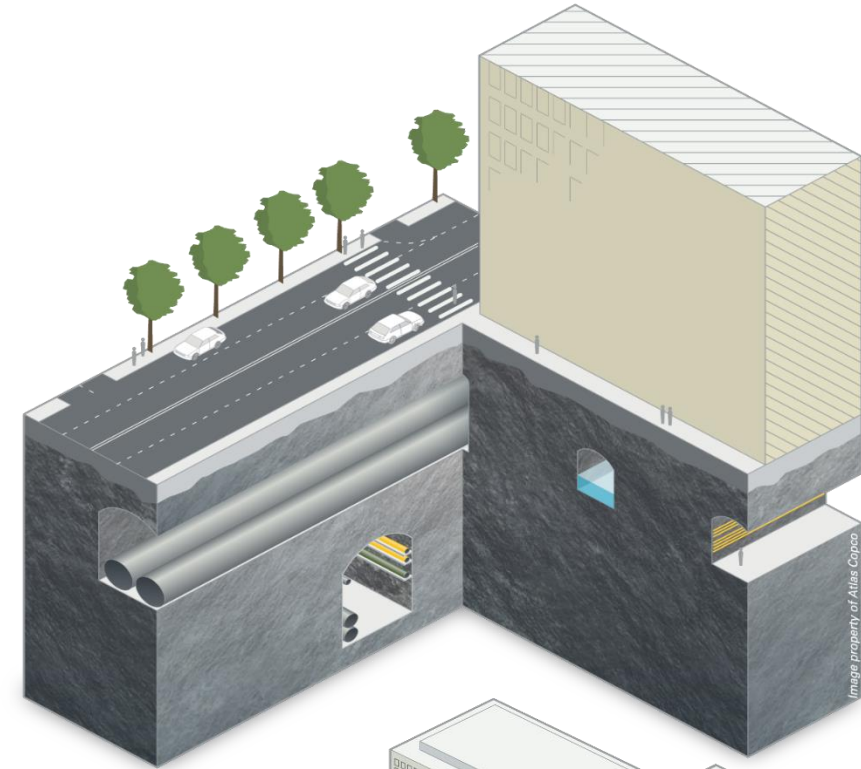
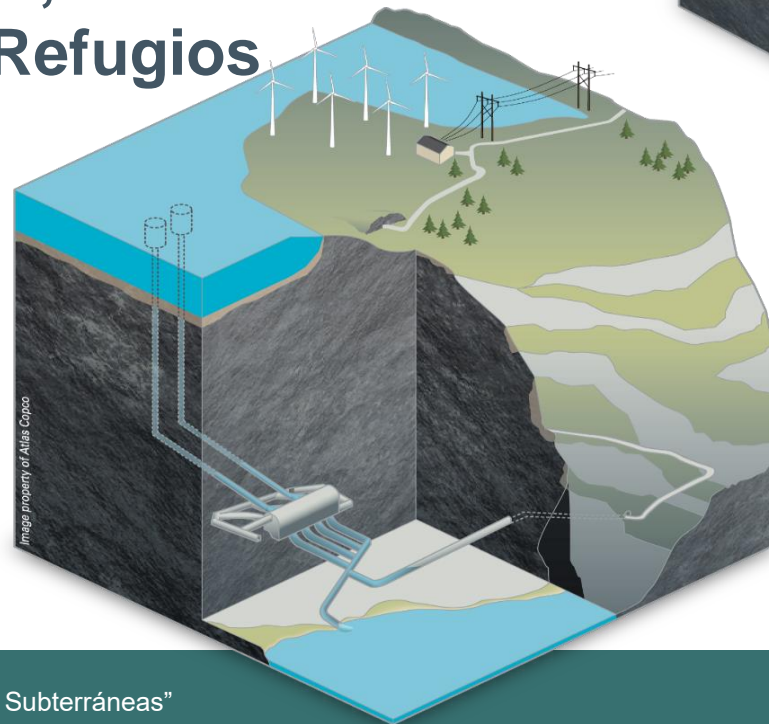
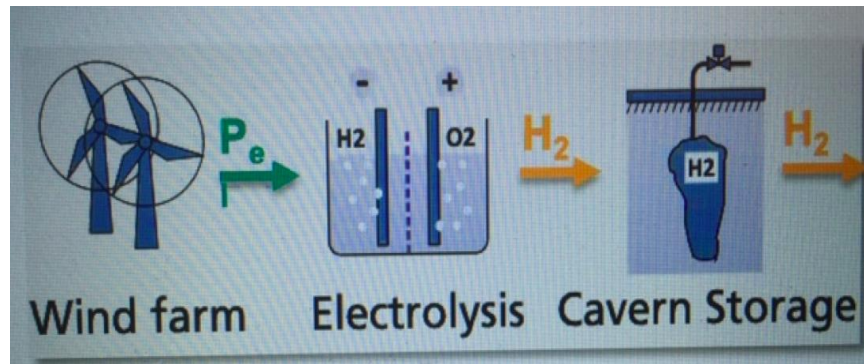
# Tuneles, Cavernas - Obras Civiles

## TUNNEL TYPE- DIFFERENT CROSS SECTIONS



# Obras subterráneas Civiles

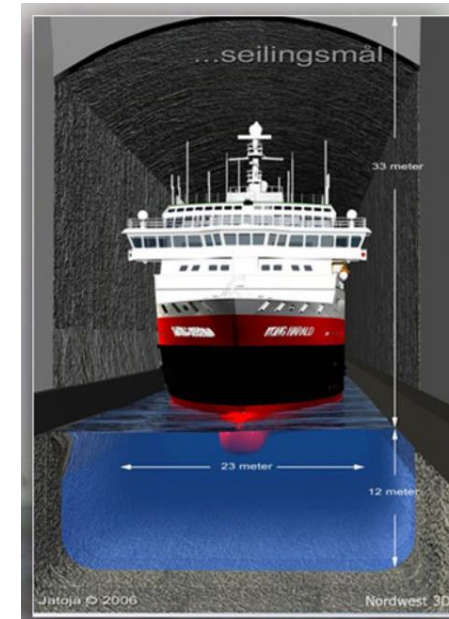
- Plantas Hidroeléctricas, Desaladas
- Túneles carreteros
- Túneles ferrocarriles, barcos
- Tunnels de servicios
- Transporte relaves, pulpa etc.
- Cavernas de almacenamiento, fines militares
- Estadios, Estacionamientos, Refugios



# Primer tunel mundial para los barcos

30mil SV Trondheim -- Utredningstadium ---- Kjødepollen til Moldefjorden. Byggestart 2018

35 meter høg, 23 meter bred og 12 meter djupgående





# Ejemplos de Túneles Desarrollados en Chile

- Obras Civiles

Túnel San Pedro (Hidro-El.)



Túnel Montenegro, ABC Regular (computarizado)

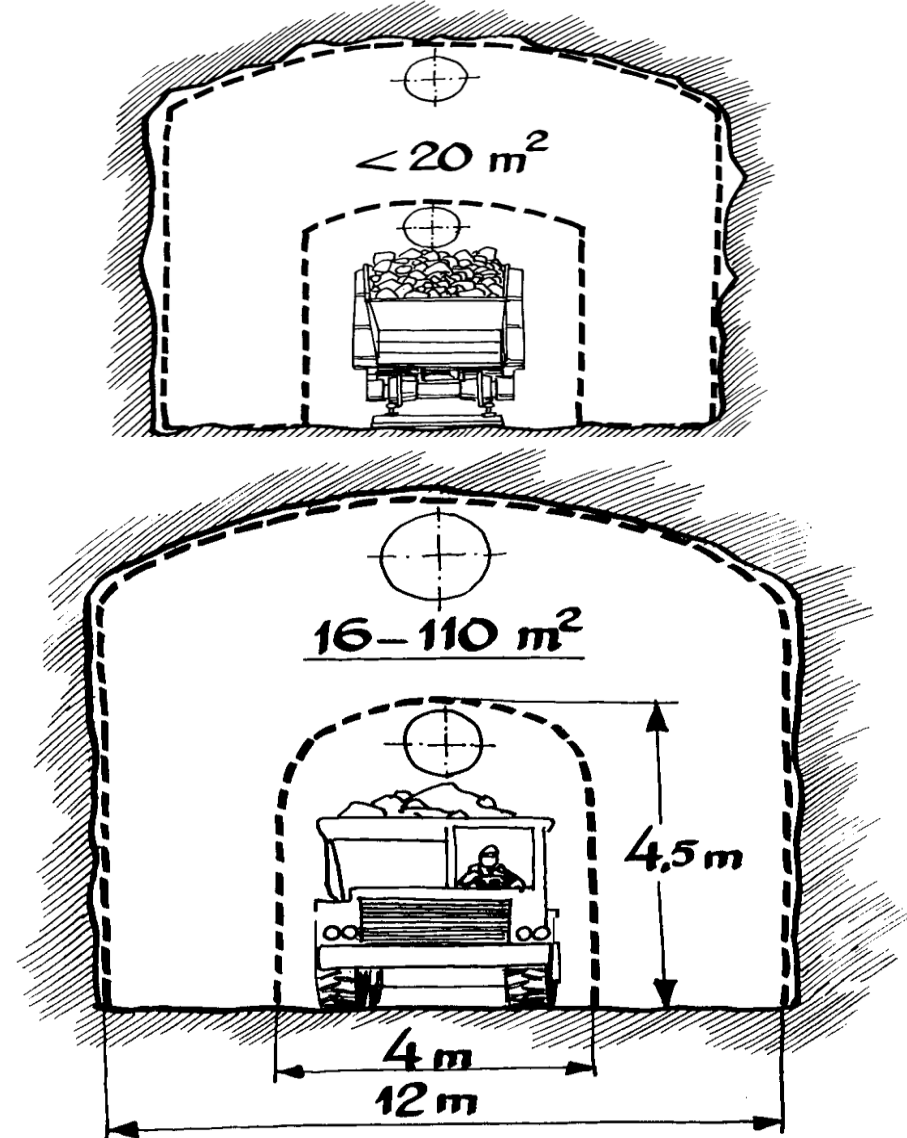
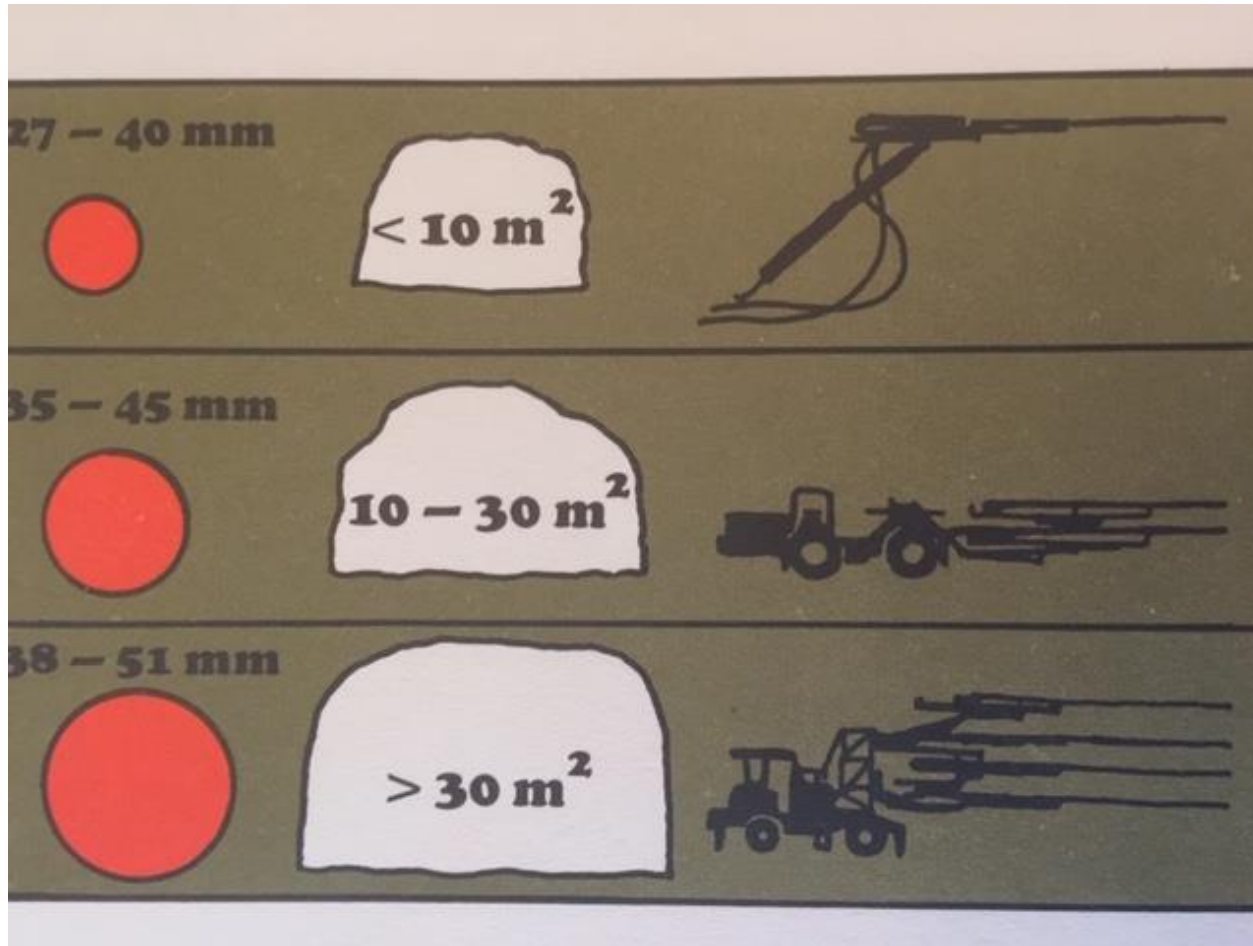


Sin marcación y mínima sobre excavación

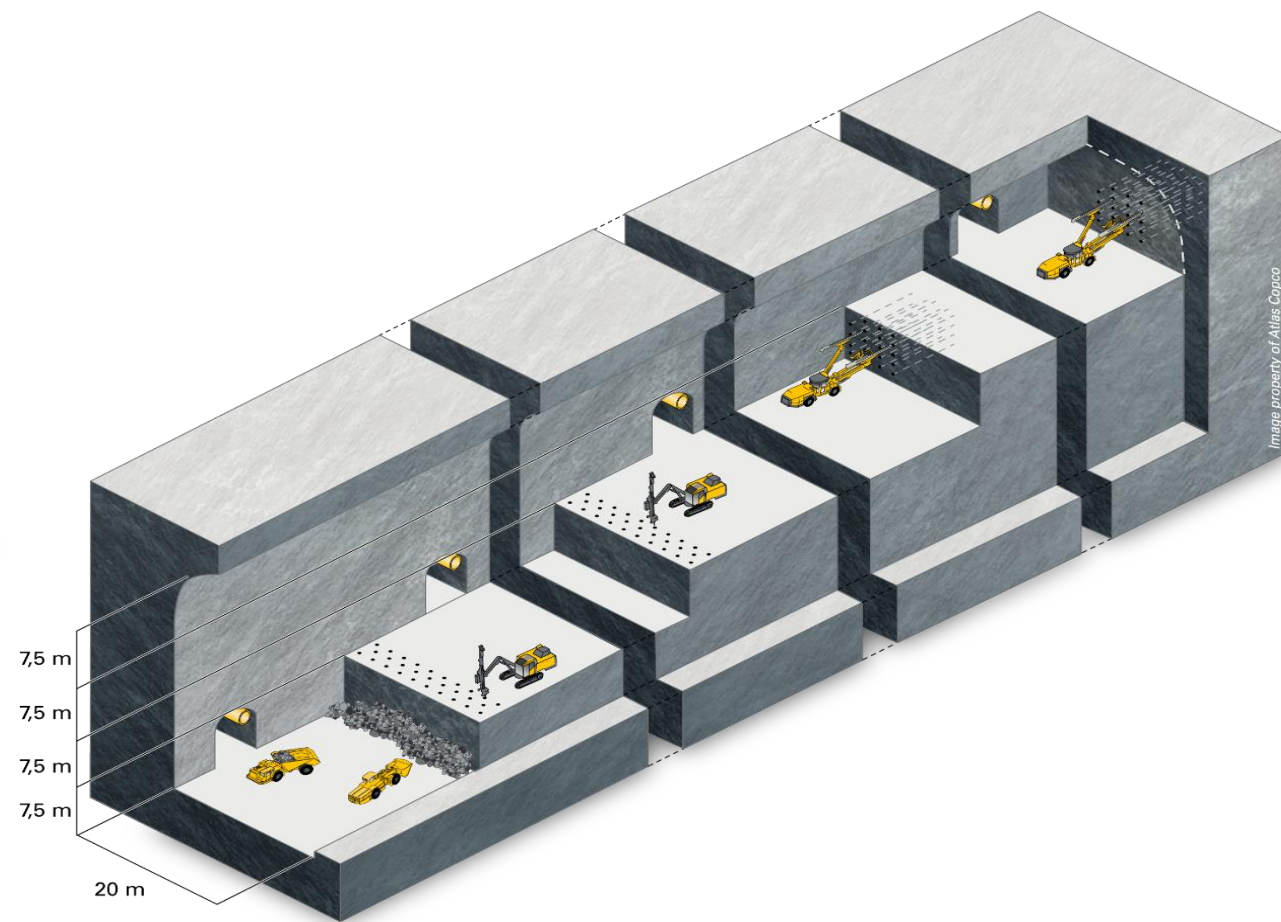
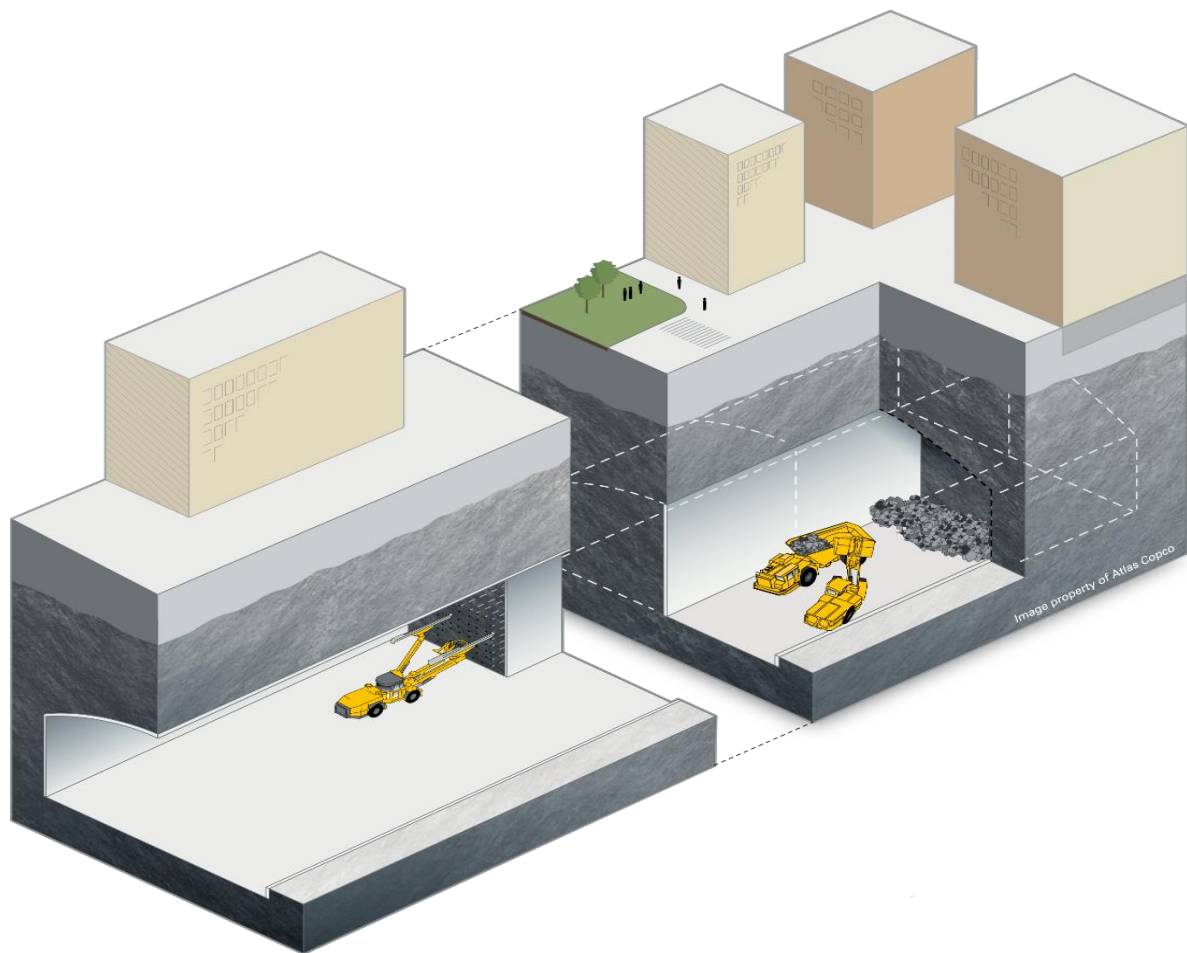
# Div.Andina - Caverna SAG 1997, 128,4m x 28m ancho y 35m de altura y para Chancandor nuevo 2020



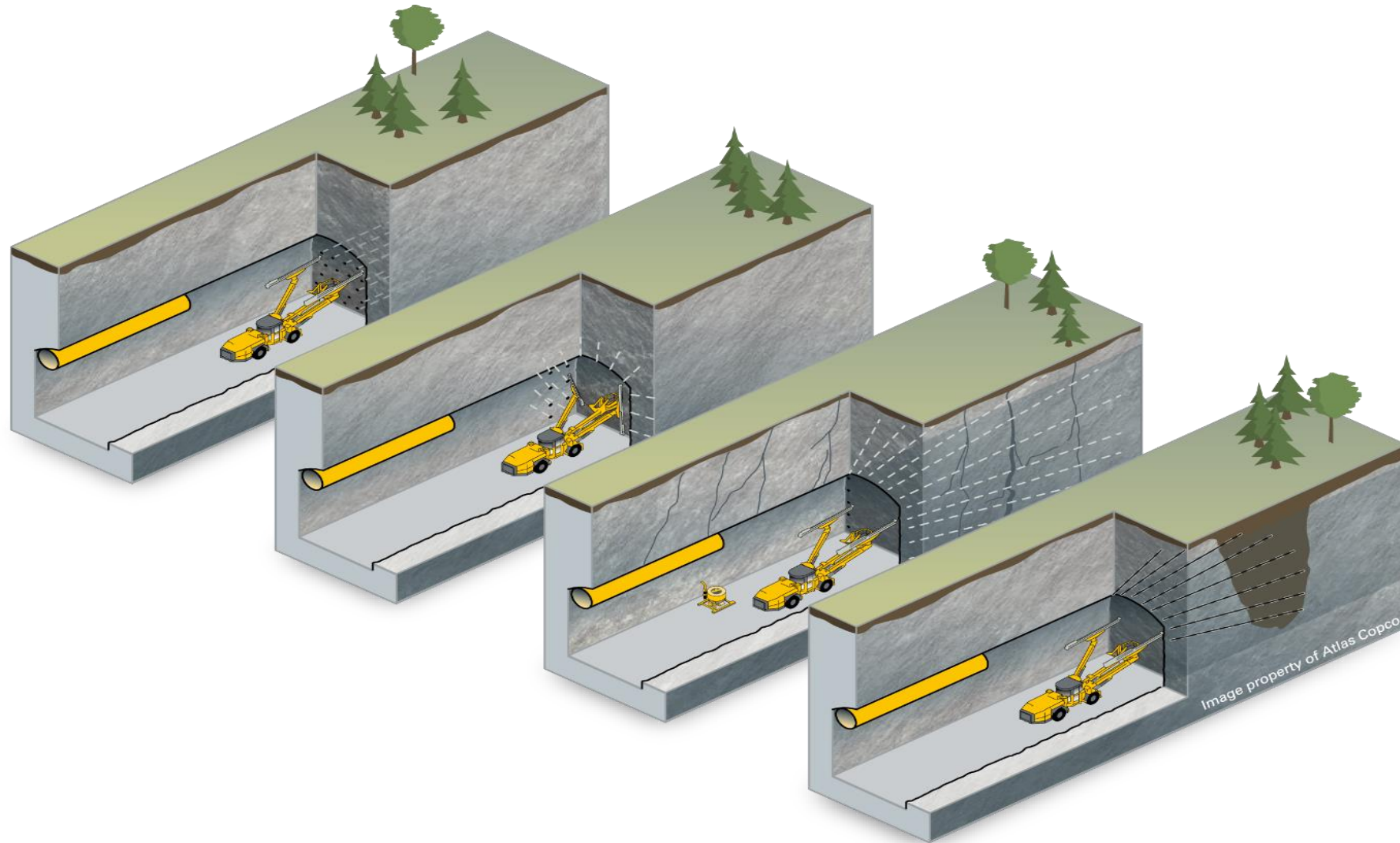
## > 2000: Cambio a Mecanización y Tipo de Transporte



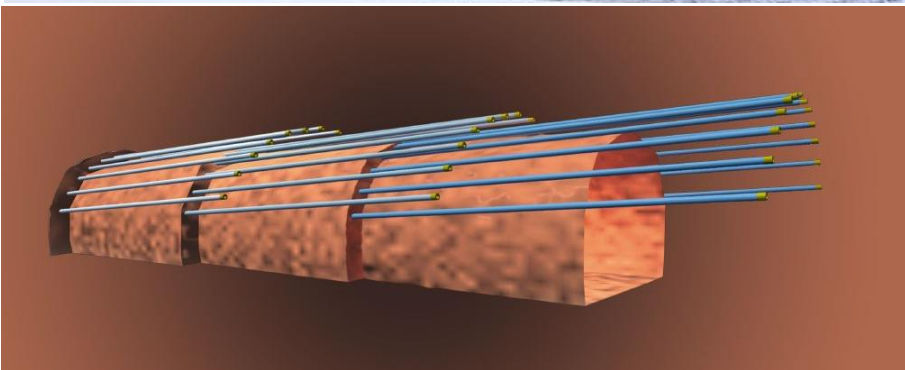
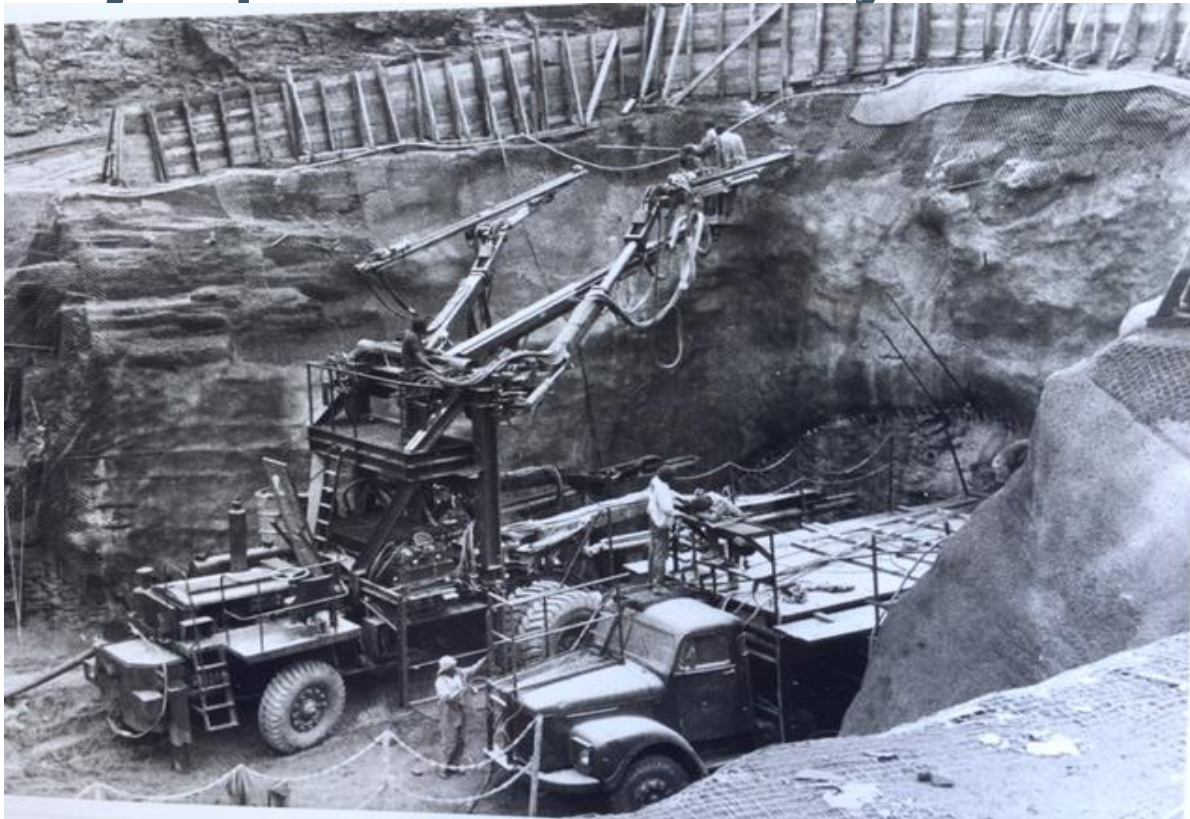
# Excavación de Grandes Tuneles y Cavernas



# Metodos de Presostenimiento de Tuneles



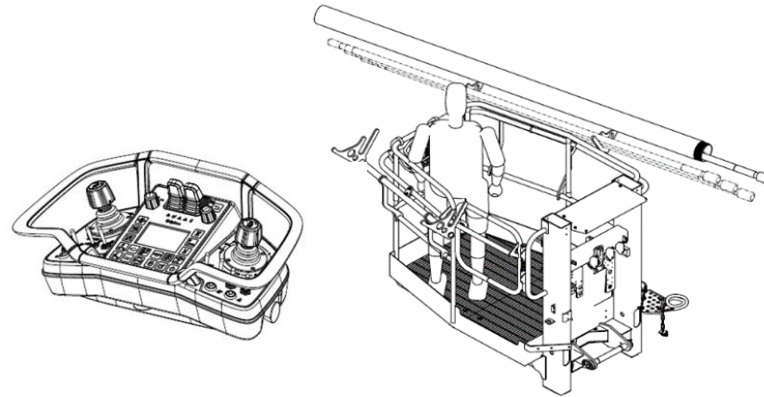
# Ejemplos: Portal 1970 y Metro Chile 2013



# Instalacion de Paraguas

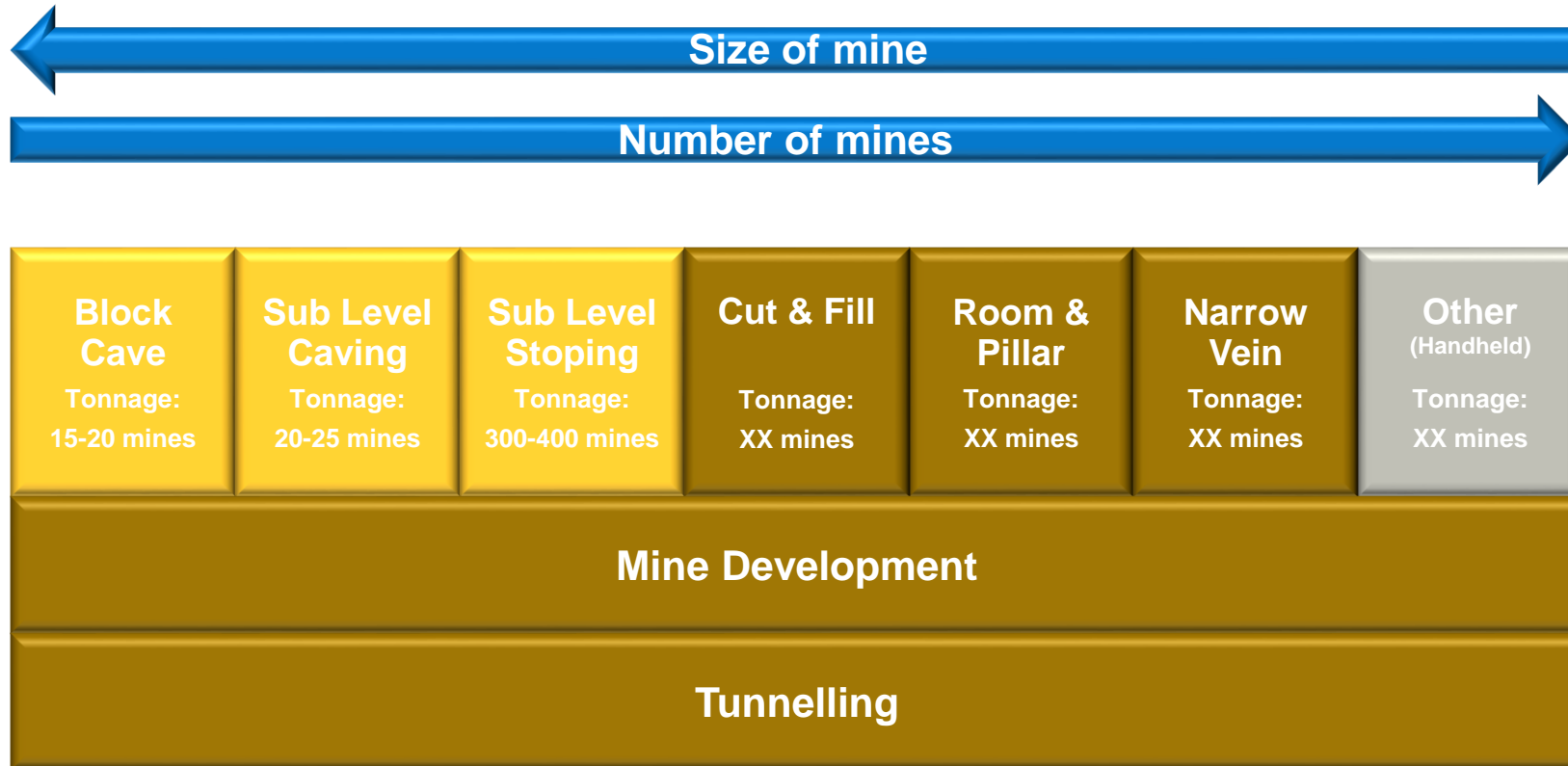
## Innovaciones

- **Mecanizacion (Semi Automatizacion)**
- **Operator safety**
  - Control desde la cabina o remoto
  - Agregar y retirar barras de perf. mecanizado
  - Elimina trabajo pesado desde el canasto
  - Tubos almacenados en el canasto
  - Sin exposición a partes rotativos
- **Ahorros**
  - Tiempo
  - Costos;
    - Menor nr. de operadores



# MINERIA: Desarrollo Horizontal

- Large scale mines
- Face drilling methods
- Handheld equipment





# TIPOS DE TUNELES (GALERIAS) MINEROS

## Acceso

- Rampas
- Entre mineral y pique
- Entre niveles

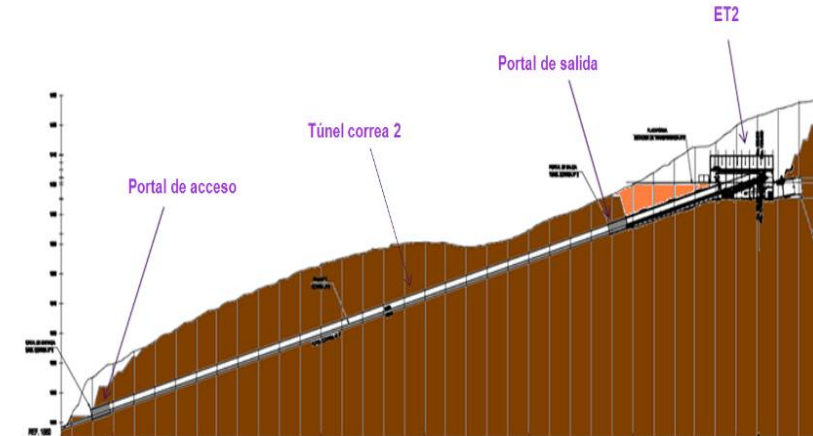
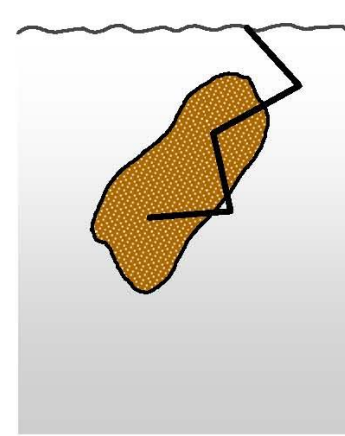
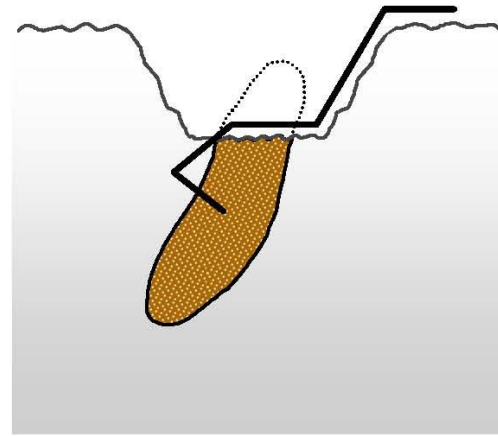
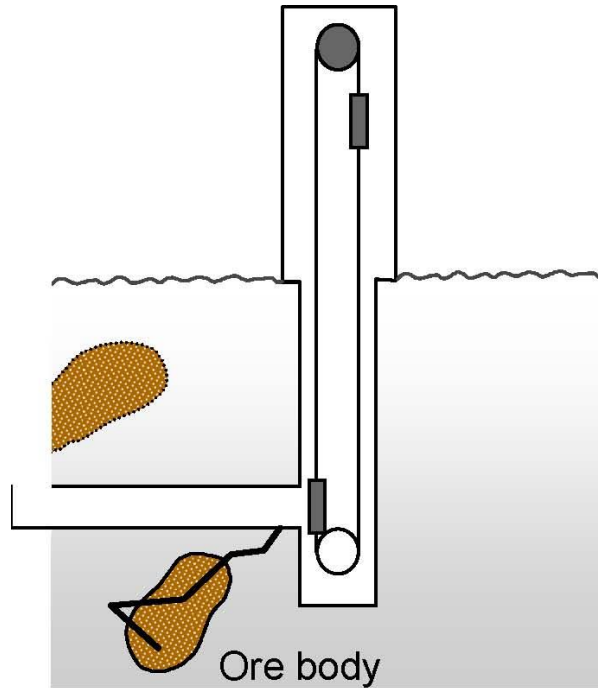
## Infraestructura

- Transporte
- Ventilación
- Cavernas

## Footprint

- Perforación
- Extracción
- Drawpoints

# Accesos y transporte de mineral para minas nuevas y existentes



# Definición de Automatización

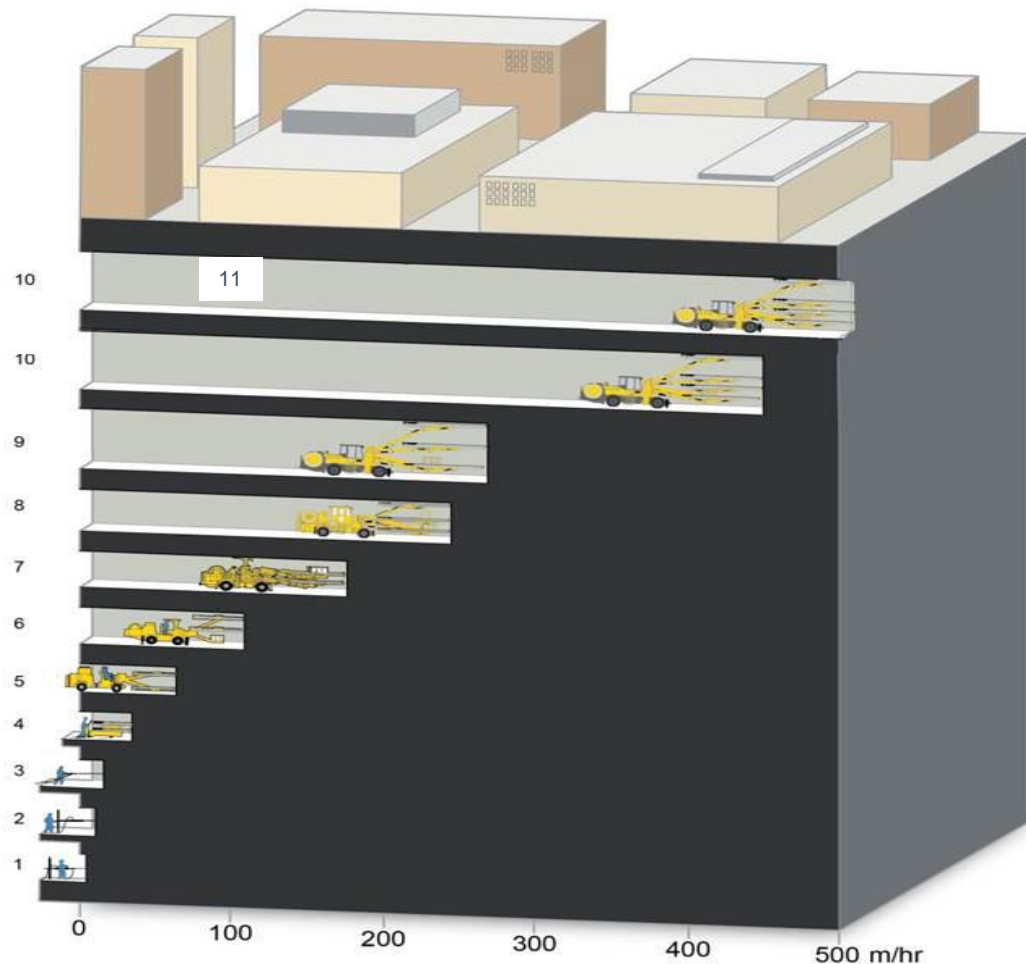
“Utilizar equipamiento auto-operatorio con el fin de reducir la exposición humana al ambiente minero y la rutina o las tareas repetitivas.” - Atlas Copco

## Terminología:

- **Operación Manual**
  - Una unidad de equipamiento siendo operada por una persona ‘en la cabina’.
- **Control Remoto por Radio**
  - Una unidad de equipamiento siendo operada de forma física por una persona a través de una Línea de Visión o Equipamiento Remoto por Video.
- **Control Tele-Remoto**
  - Una unidad de equipamiento siendo operada físicamente por una persona en una estación que no se encuentra necesariamente cerca del área de trabajo del equipamiento.
- **Operación Autónoma (Semi- Autónoma).**
  - Una unidad de equipamiento bajo control autónomo con la posibilidad de supervisión y anulación humana.

# Desarrollo de la perforación 1905 - 2018

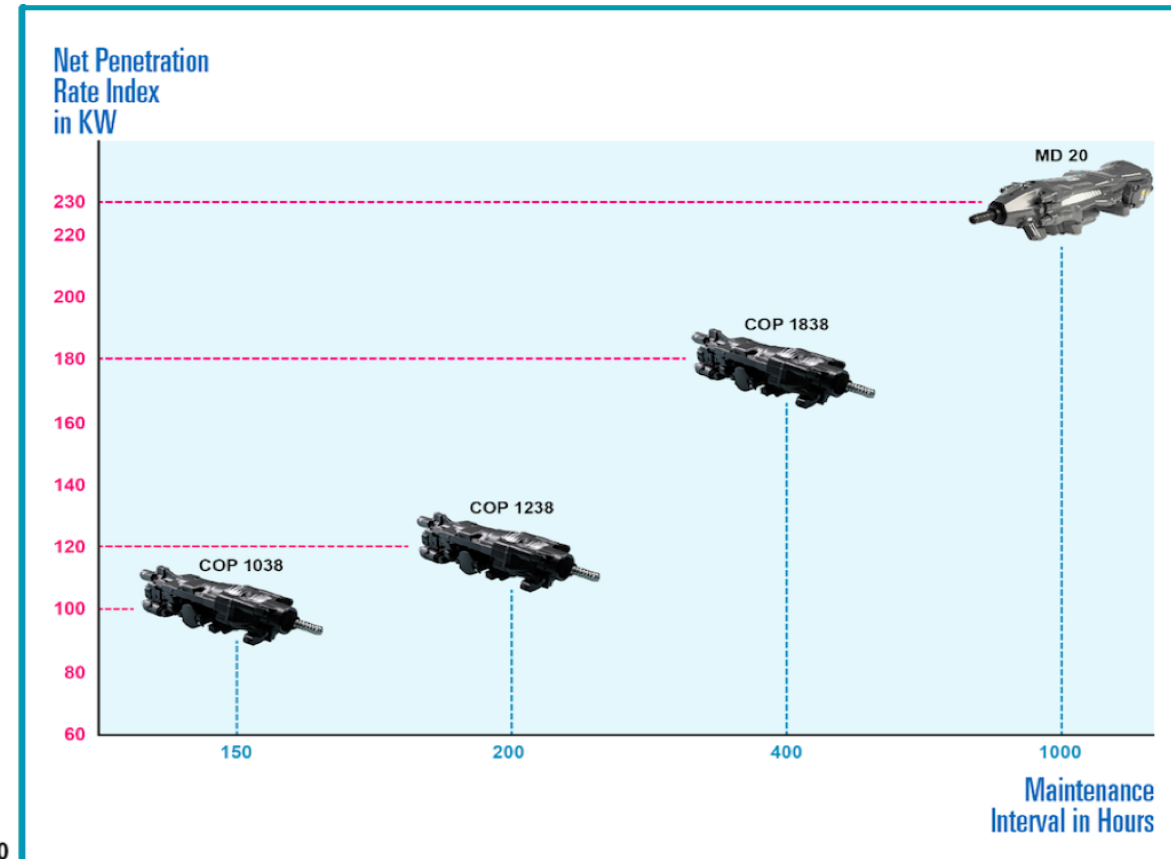
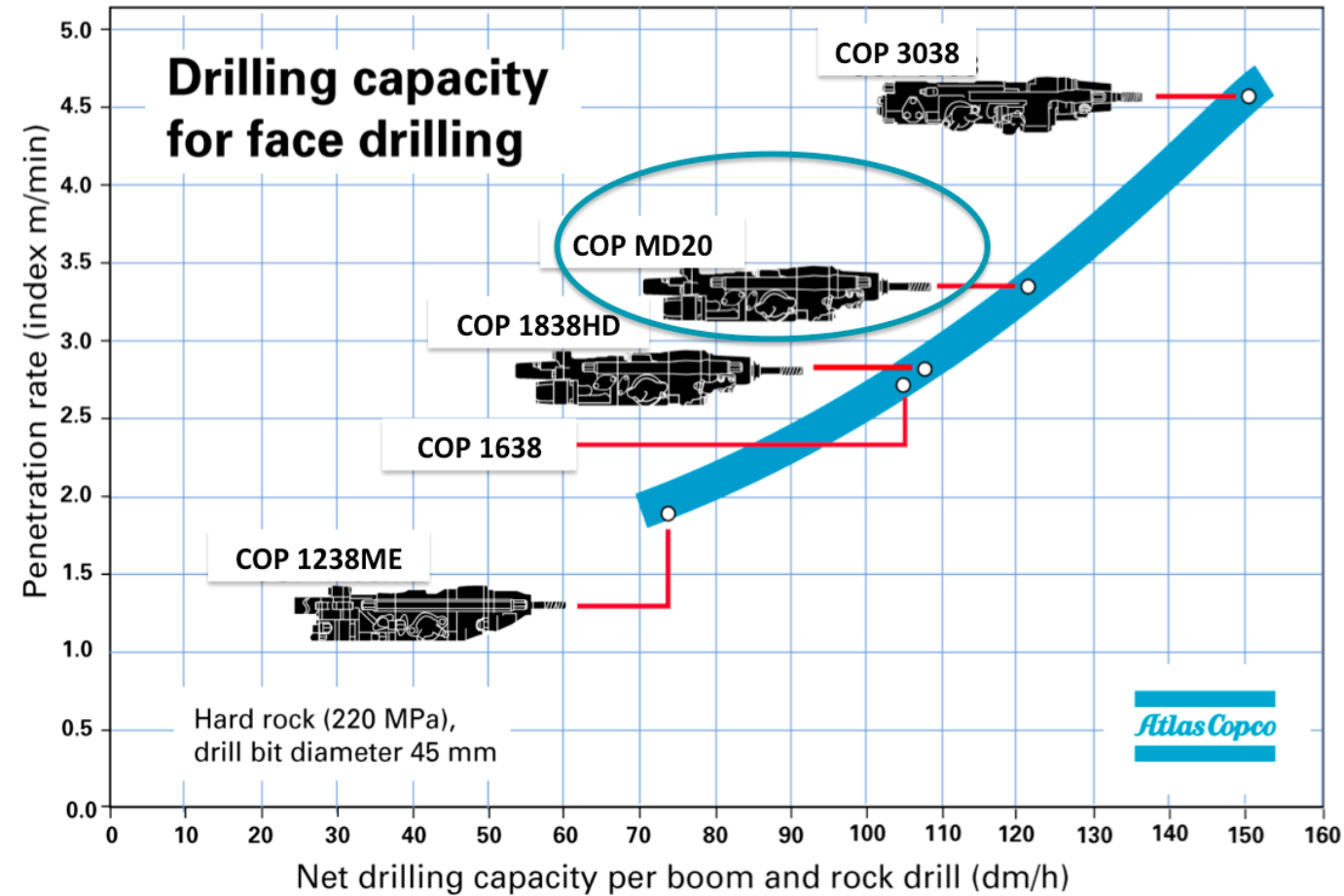
Capacidad en mtsperf./horahombre



- 1 1908 - Cyclop 50 3-5 m/hr
- 2 1928 - RWT 80 8-10 m/hr
- 3 1948 - RH 656 "The Swedish method"
- 4 1963 - ZAX 202 2 x rock drill BBC 22 35 m/hr
- 5 1968 - COP Rock drill for mounting on boom
- 6 1973 - Boomer 132 2 x rock drill COP 1038 110 m/hr
- 7 1983 - Boomer H178 3 x rock drill COP 1238 180 m/hr
- 8 1992 - Rocket Boomer H353 3 x rock drill COP 1838 250 m/hr
- 9 2000 - Rocket Boomer XL3 C 3 x rock drill COP 1838 and ABC Total 275 m/hr
- 10 2005 - Rocket Boomer XL4C30 4 x rock drill COP 3038 and with ABC Total 450 m/hr
- 11 2012 - Boomer XE4 with 4 x COP 4038 rock drills and with ABC Total more than 500 m/hr
- 12 2018 5<sup>th</sup> RCS generation

# Desarrollo de Perforadoras Hidraulicas

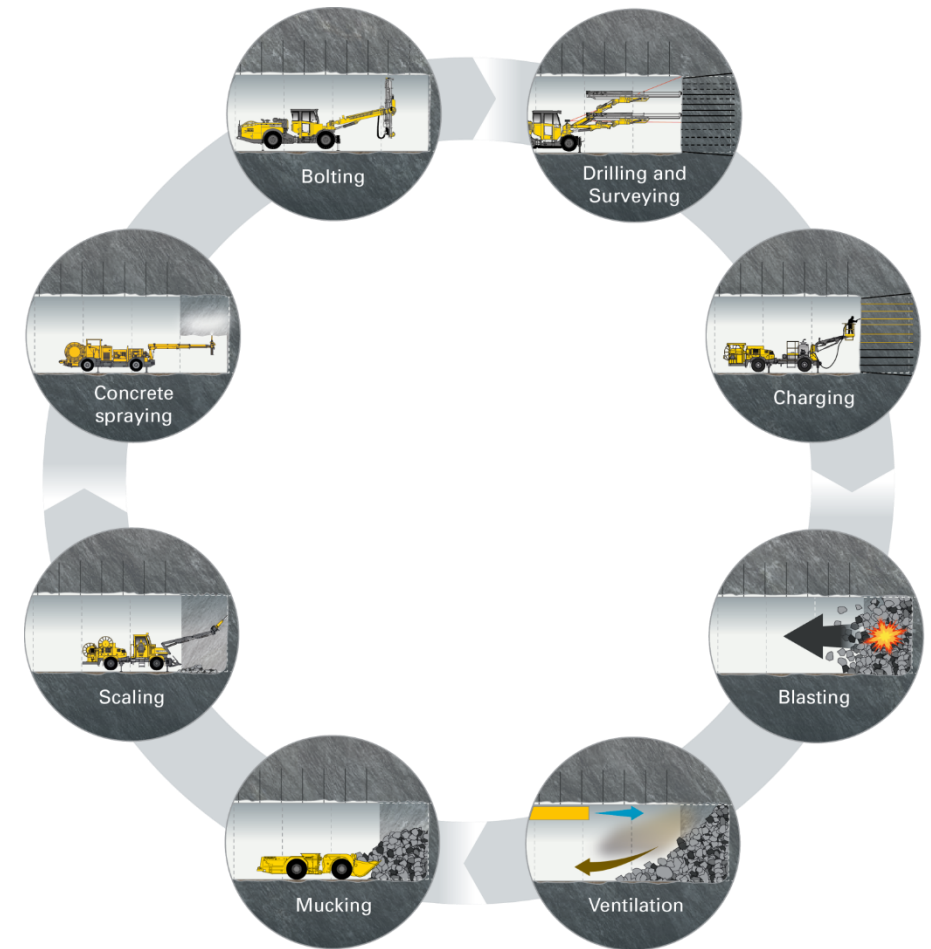
Focus en intervalo de mantenimiento vs rapides de perforación



# Rapid Mine Development

El “nuevo” concepto del desarrollo de tuneles mineros (one face)

- Para llegar de punto A a B con máxima seguridad y rapidés
- Implementación de la ultima generación de los equipos
- Lo que no es mayormente entendido es que los equipos, tecnología y las prácticas es solo un comienzo para obtener los avances de Rapid Mine Development.
- Rapid Mine hoy día es una frase usada en varios lugares del mundo para describir la implementación tecnológica y las prácticas de tuneléo de obras civiles a las aplicaciones mineras.
- Fortificación es una operación que mas tiempo ocupa en el ciclo de tuneléo (P&T) y necesita mejoramiento.
- Esto significa que para la mayoría de las operaciones mineras puede requerir cambios radicales en el pensamiento y la cultura



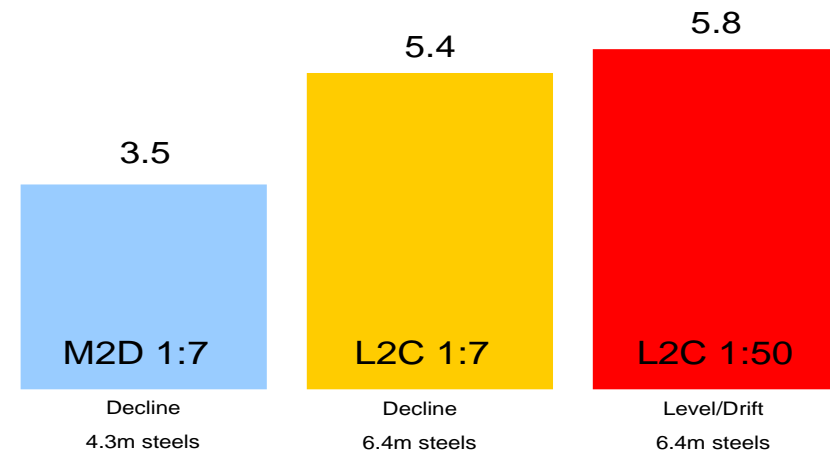
# RAPID MINE DEVELOPMENT – Nació en Australia (2009)

- RECOMENDACIONES DE NEWCREST
- Sección óptima 5,5m x 6m (min 5,0m x 5,5m)
- Perforadoras super rapidas (Cop 3038), Deslizaderas de 21´ (18´)
- Explosivos de Emulsion, Tronadura según demanda
- 21t (18t) LHD con 60 (65t) camiones mineros
- Estocadas cada 200m
- Combinación Boomer/Boltec
- Team Work : Mandante/Proveedor

## Rapid Development

Development Cycle Analysis - Drilling

Results - Average Advance per round

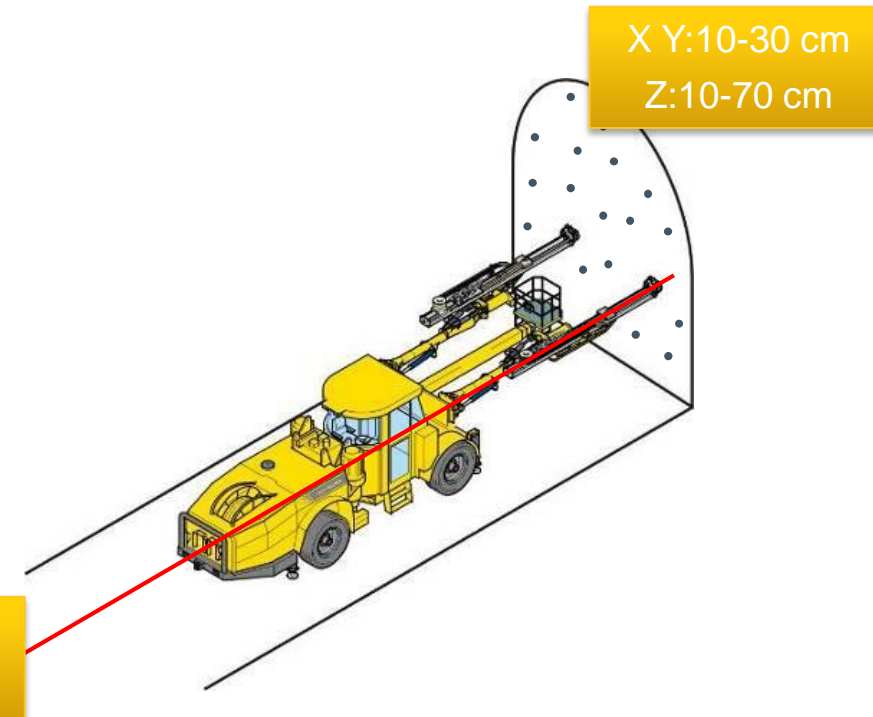


Resumen A.Zablocki

Atlas Copco

# Navigation

- Mine navigation
- Boom in laser
- Tunnel profiler
- Total station
  - External total station
  - Internal total station





# Niveles de automatización del Jumbo (perf. horizontal)

## Advance Boom Control (ABC)

### ABC Pure

- Opera como un equipo hidráulico convencional pero mantiene los beneficios de un menor consumo de acero, mayor rapidez y mejoras en los controles y la comodidad del operador.

### ABC Regular

- Reportabilidad (numero de tiro, tipo, tiempo de perforación, largo, dirección, etc.).
- Asistencia para el posicionamiento de los brazos con diagrama digital (ya no es necesario marcar la frente).

### ABC Total

- Posicionamiento y perforación automático de los brazos siguiendo una secuencia programada.

### ABC Regular *Boom and feed moved by operator*



- Display of collaring point/hole direction/hole depth
- Logging (PCMCIA-card) hole no./hole type/drilltime per hole

### ABC Total *Automatic positioning of boom and feed*



- Additional features:* Hole sequence programming  
Collision control of booms

# Perforacion Precisa

## Efectos de sobreexcavación

- Mayor tiempo de acuñadura
- Mayor volumen de marinas a extraer
- Aumentan los requerimientos de fortificación (volumen de hormigón proyectado).
- **Mayores costos de operación y menor productividad**

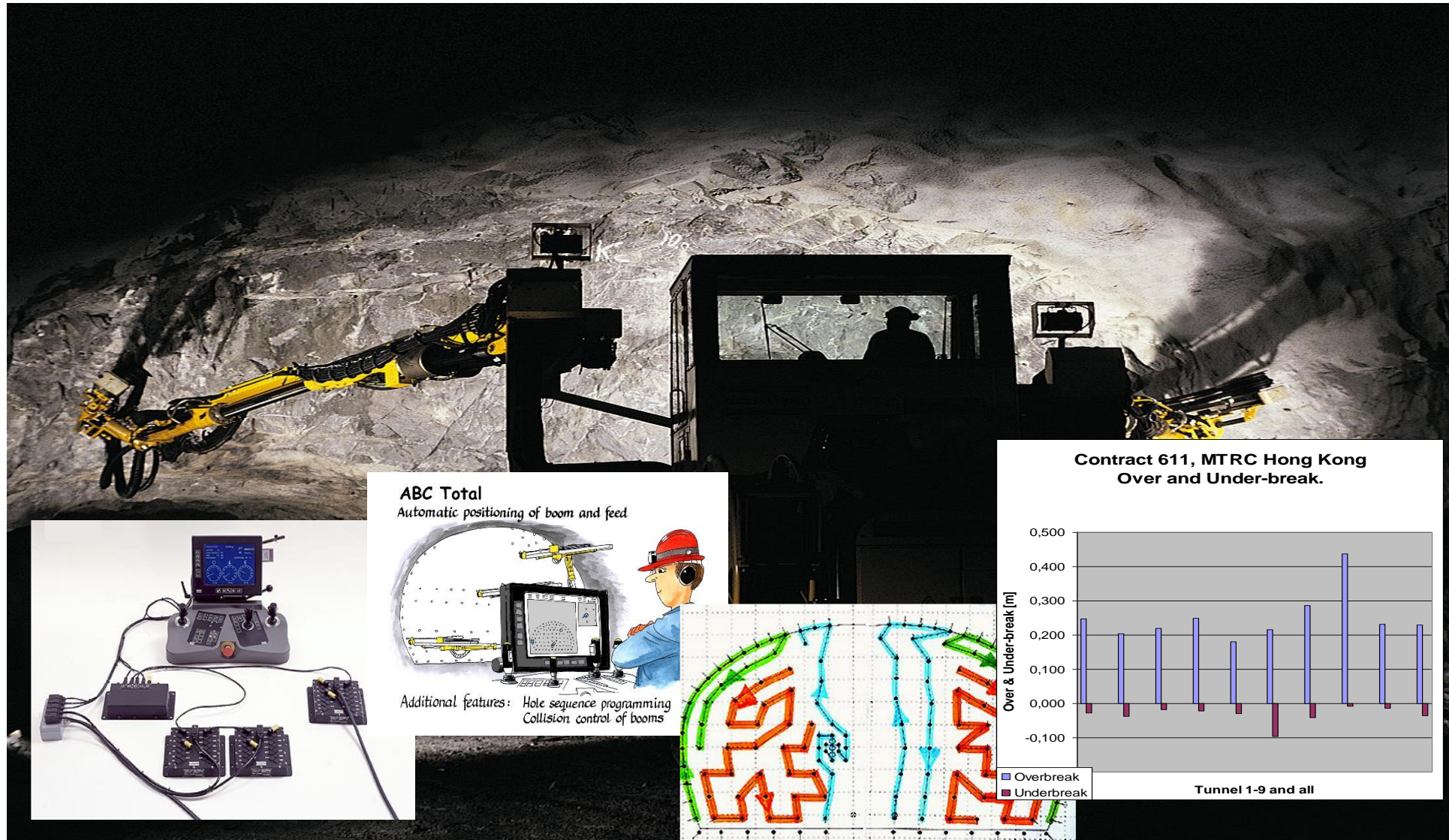


a. Relatively good quality tunnel contour (Upper Tamakoshi Project, Nepal)



b. Relatively poor quality tunnel contour with excessive over-break (Khimti Project, Nepal)

# Heramientas para un control total de perforación



**ABC Total**  
Automatic positioning of boom and feed

Additional features: Hole sequence programming  
Collision control of booms

**Contract 611, MTRC Hong Kong**  
Over and Under-break.

Over & Under-break (m)

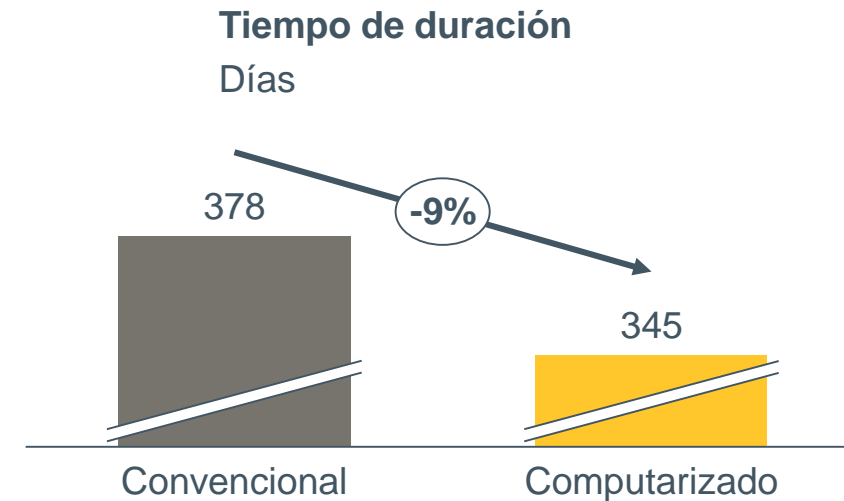
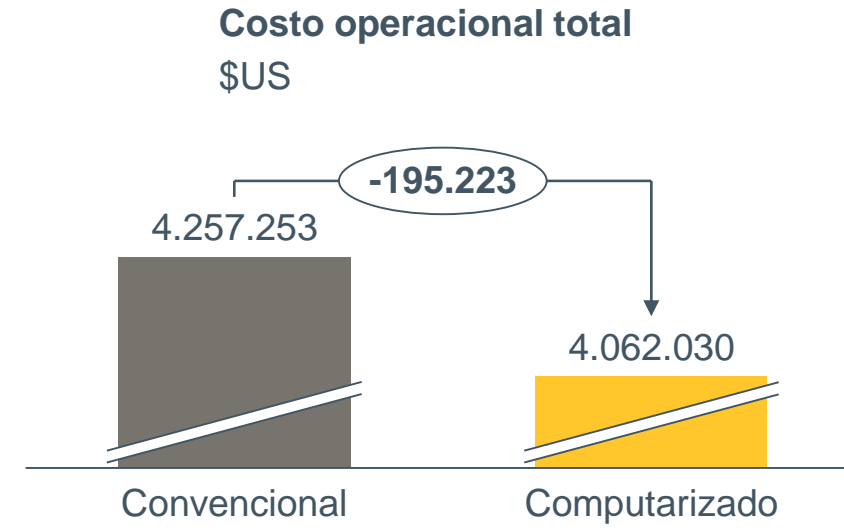
Overbreak  
Underbreak

Tunnel 1-9 and all

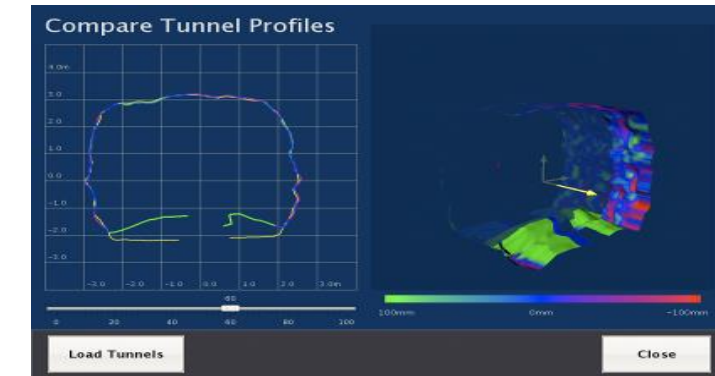
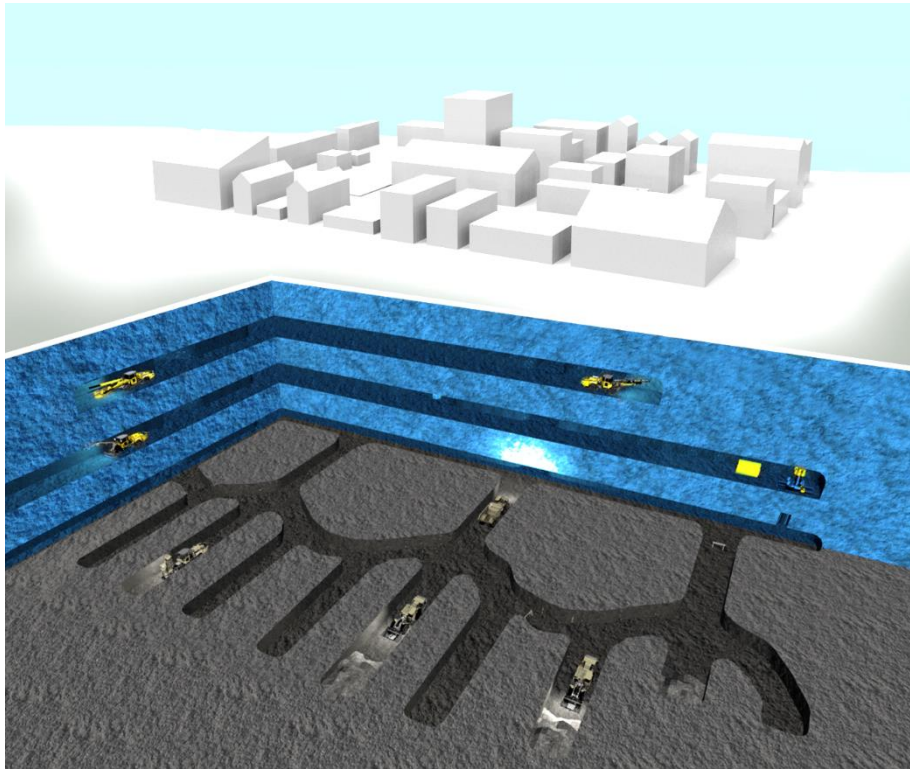
Tunnel	Overbreak (m)	Underbreak (m)
1	0.25	-0.05
2	0.20	-0.05
3	0.22	-0.05
4	0.25	-0.05
5	0.18	-0.05
6	0.22	-0.10
7	0.28	-0.05
8	0.45	-0.05
9	0.23	-0.05
all	0.23	-0.05

# Análisis económico

Parámetro	Valor
Metros de túnel [m]	1400
Tamaño galería [m]	4,5x5,5
Equipo	S2C
Perforadora	COP 1838HD+
Longitud de barra [ft]	14
Diámetro de perforación [mm]	45



# Automatizacion en Desarrollo de Galerias (Multiface)



# Desarrollo de Galerias - Mediana Minería (SLS)

## Proyecto de Desarrollo Rapido (multiface): Disminución de tiempo de ciclo de 12,5 a 9,0 Hrs.

- Secciones 5.0 x 4,5m
- Jumbos (2 brazos) de la ultima generación
- Perforación efectiva de 3,8 a 4,6m, diam. 51mm
- Perforacion autónoma ( hasta 70%).
- Bits tipo “power”: >10% penetración, 50% intervalo afilado
- Explosivos de Emulsión
- LHD´s de mayor capacidad

Ítem	2019	2020*
PERFORACIÓN EFECTIVA (mts)	4,30	4,24
AVANCE/DISPARO (mts)	3,70	4,16
AVANCE/DISPARO (%)	86	98
SOBRE-EXCAVACIÓN (%)	17	5
TIEMPO ACUÑADURA (hr/mts)	0,75	0,58

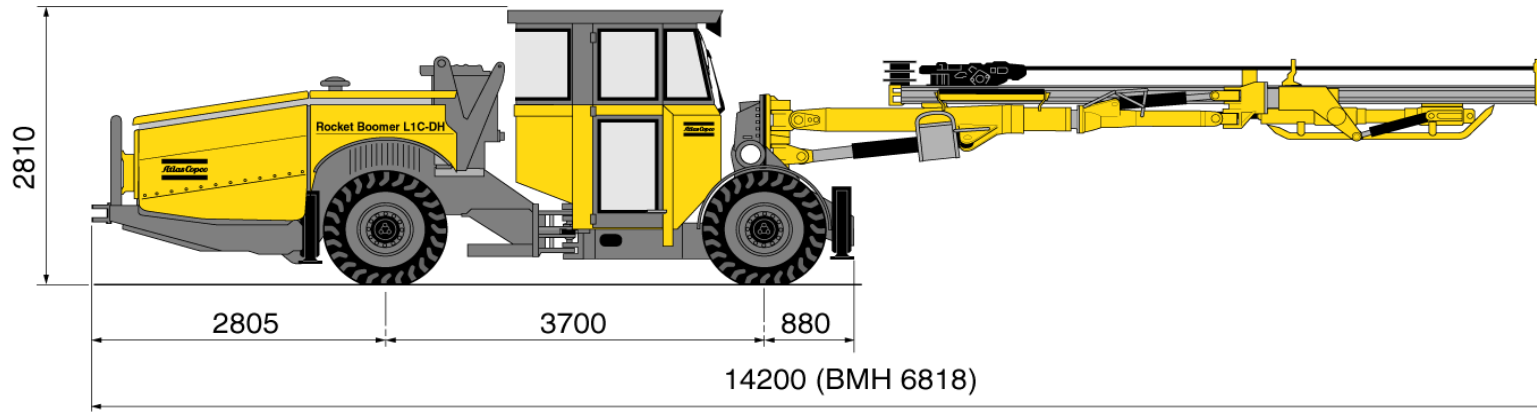
# RCS Total para Minería

- CONTRATISTA Minero RUC (Australia)
- “Most Advance Mining Contractor in the Game “
- Contracts for InSig Technologies, Mount Morgans mine
- Con Boomer S2C, autodrill system tienen mayor vida útil de aceros
- Y hasta cinco mas disparos por semana por mayor rendimiento
- Compacto con gran cobertura (8,5mx 6,0m)
- Utilizan Wi Fi network de la mina para control remoto del jumbo.

Fuente: IM, Abril 2020



# Alternativa: Diesel Hidráulica



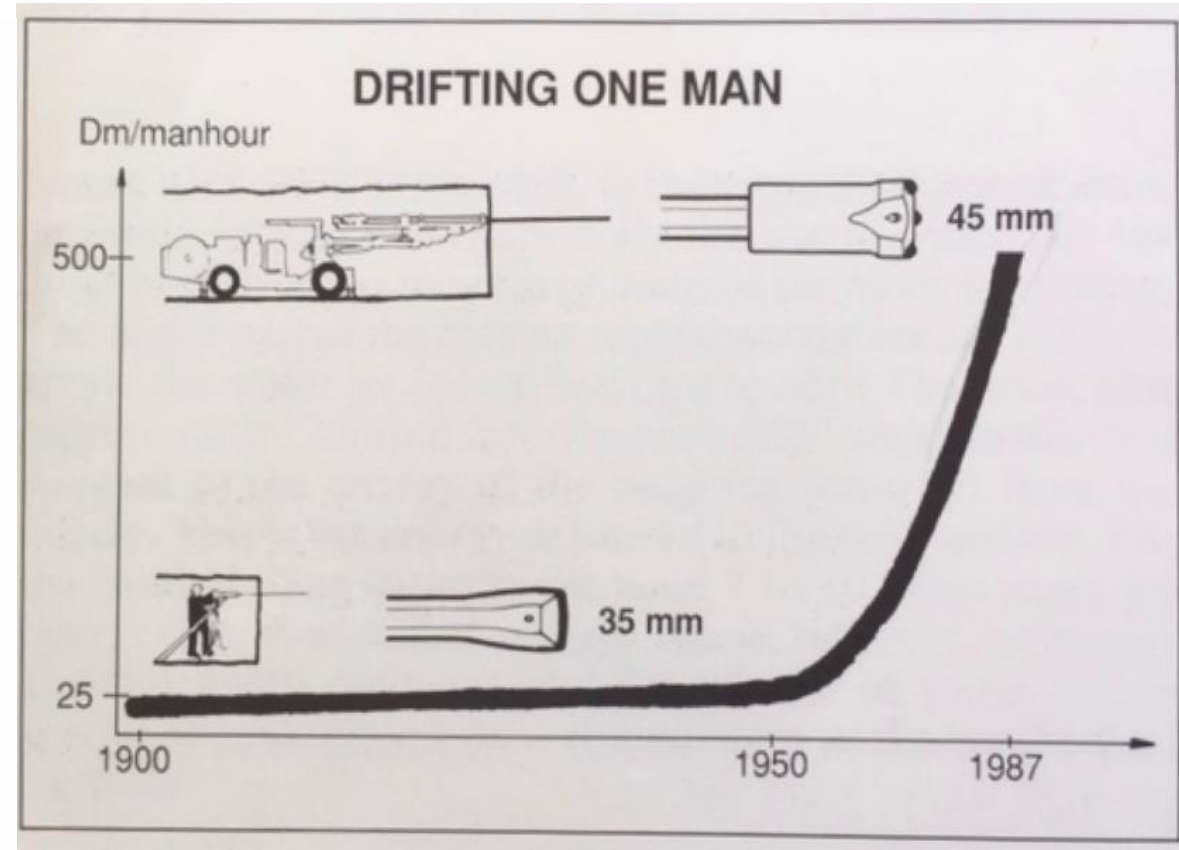
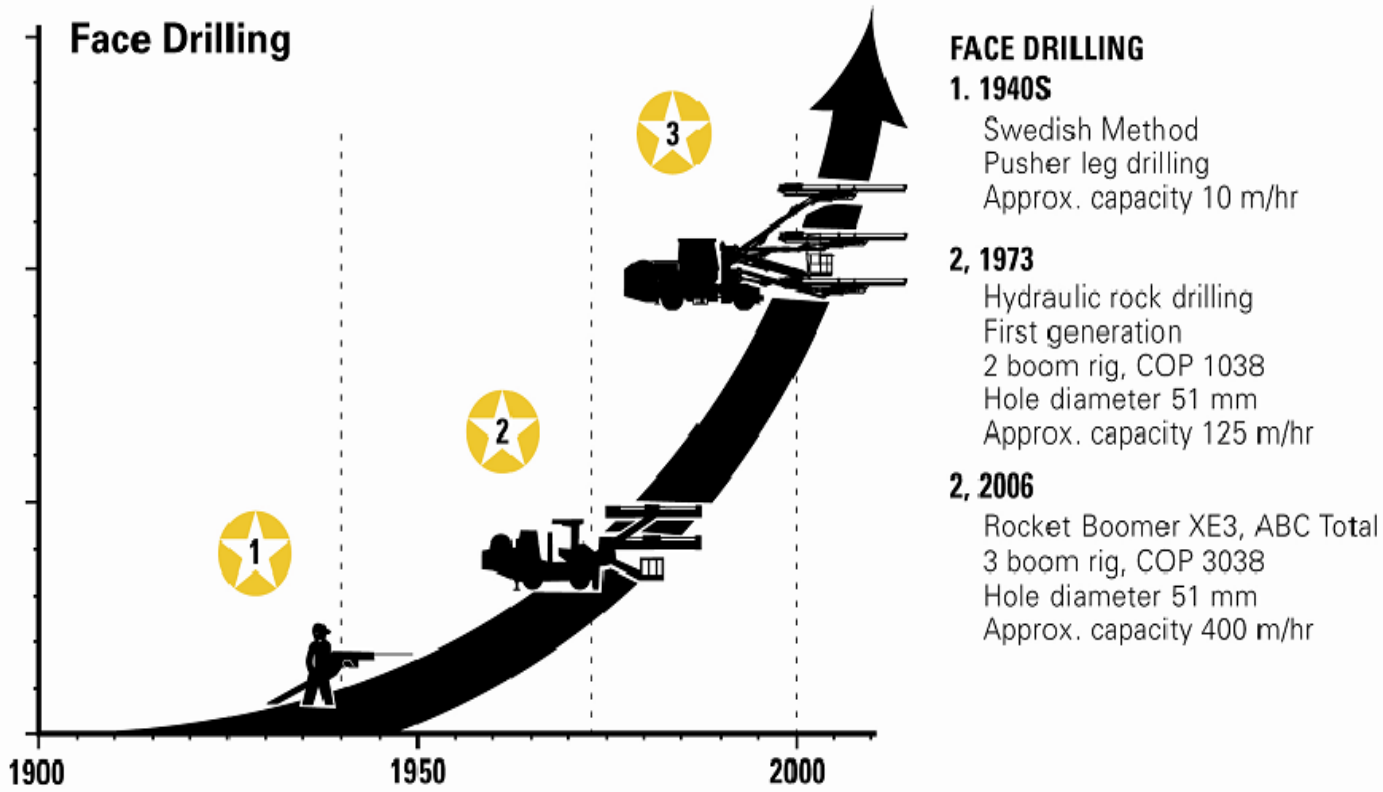
**Mediana minería en Chile, Ejemplo: Mina Panulcillo**  
**Perforación con Boomer E1/L1 de un brazo, multifrentes**  
**Autónomo con estanque de agua y compresor a bordo**  
**Secciones: rampas 5m x 5m , galerías de perforación 4m x 4m, 4 a 5 disparos/ turno/ equipo.**  
**Barrenos de 3,8 a 4,3m de longitud , bits 45mm**  
**Rendimientos: 71m perf./ hr, 495m/turno.**  
**Carguio F&L y LHD de 14t. Camiones de 20m<sup>3</sup>**  
**Avance 373m/mes/ equipo**





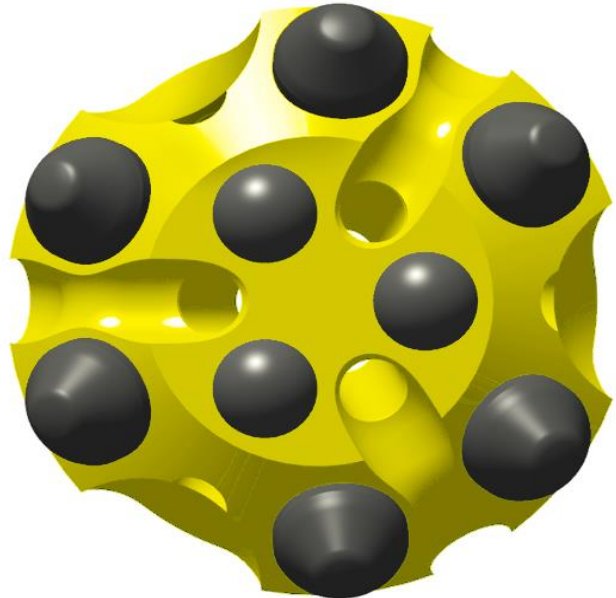
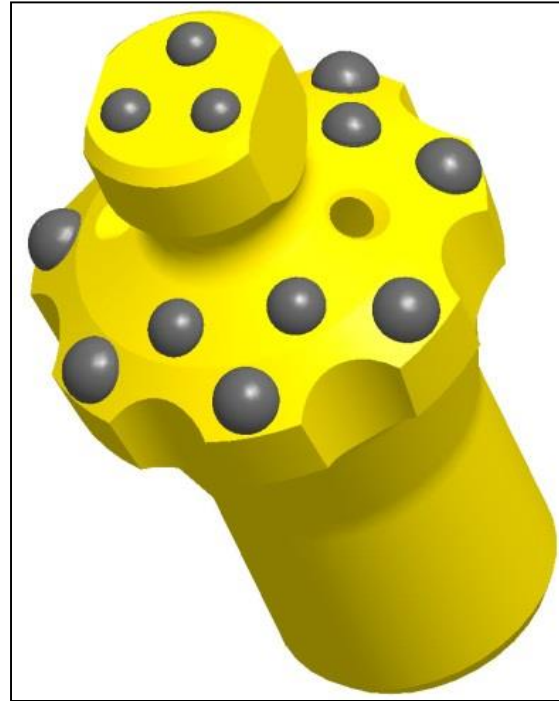
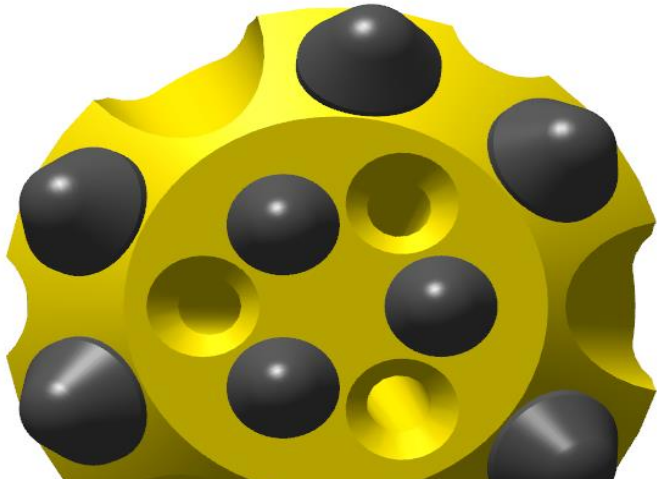
# Desarrollo de Perforadoras Hidraulicas

## Importancia de aceros de perforación

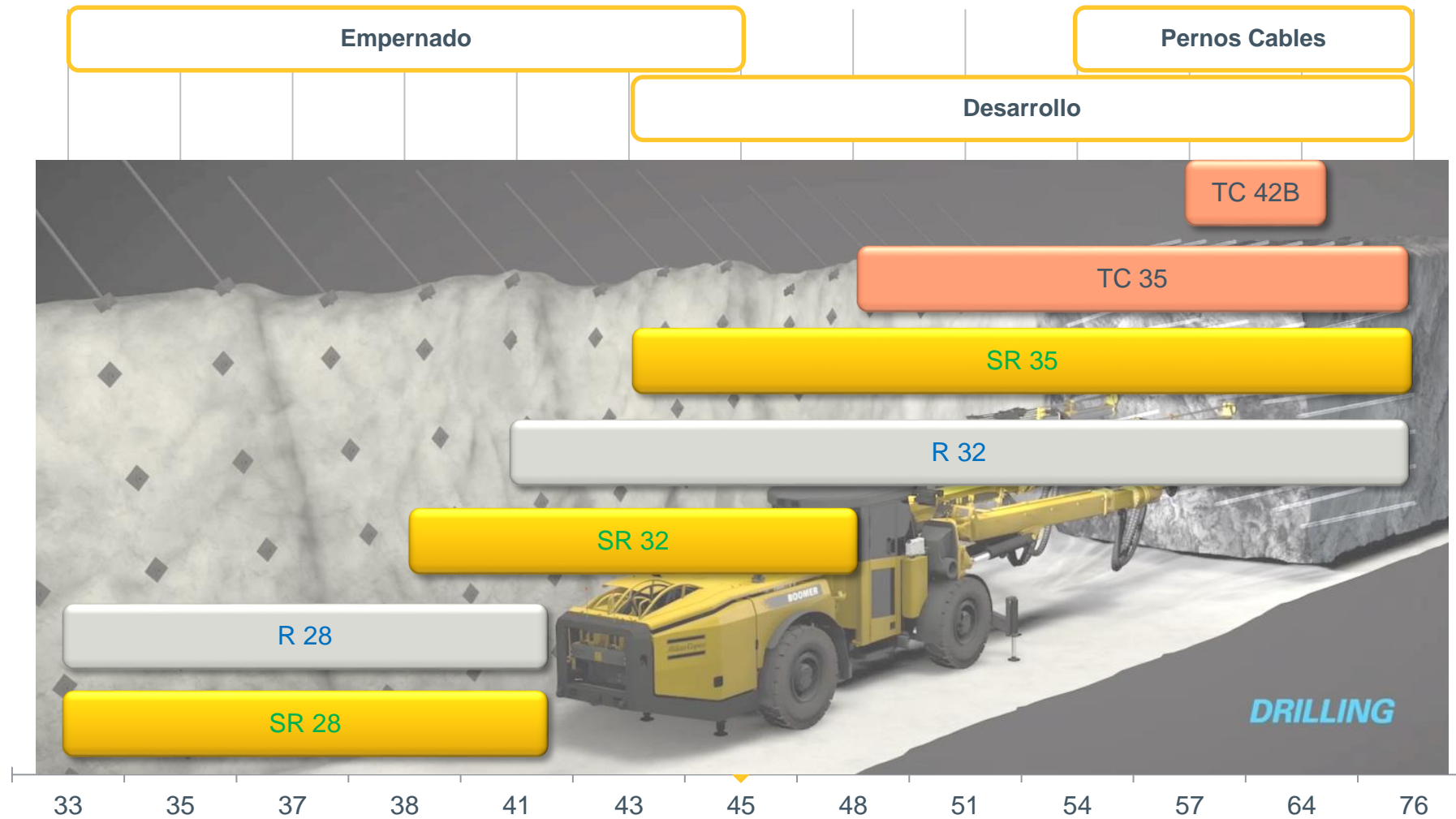


# Aceros para Perforacion Horizontal

Bits Balistico y Trapesoideo , tipo de hilos según aplicaciones ( empernado, cableo)



# Aplicacion vs. Tipo de hilo



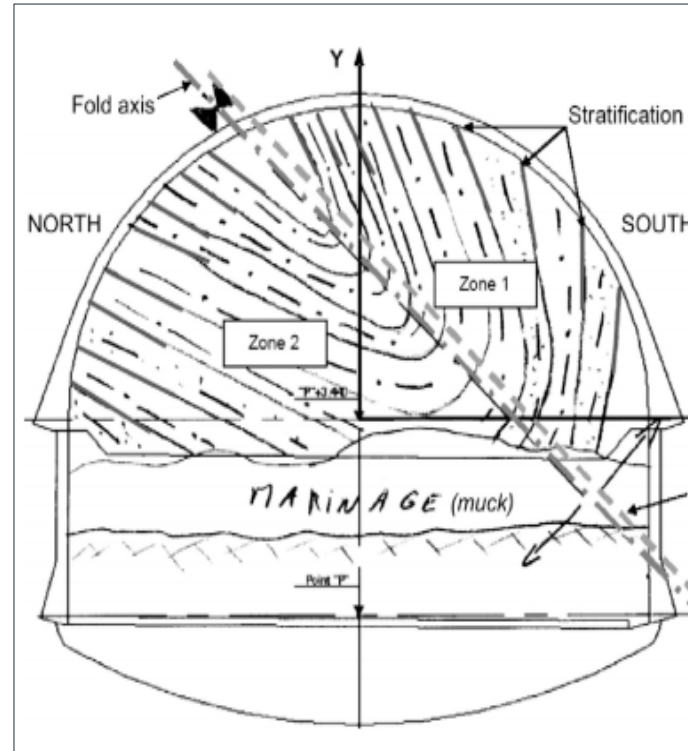
Diámetro de perforación

# Resultados de avance optimo de disparo

## Factores que la influncian



Precisión de la perforación

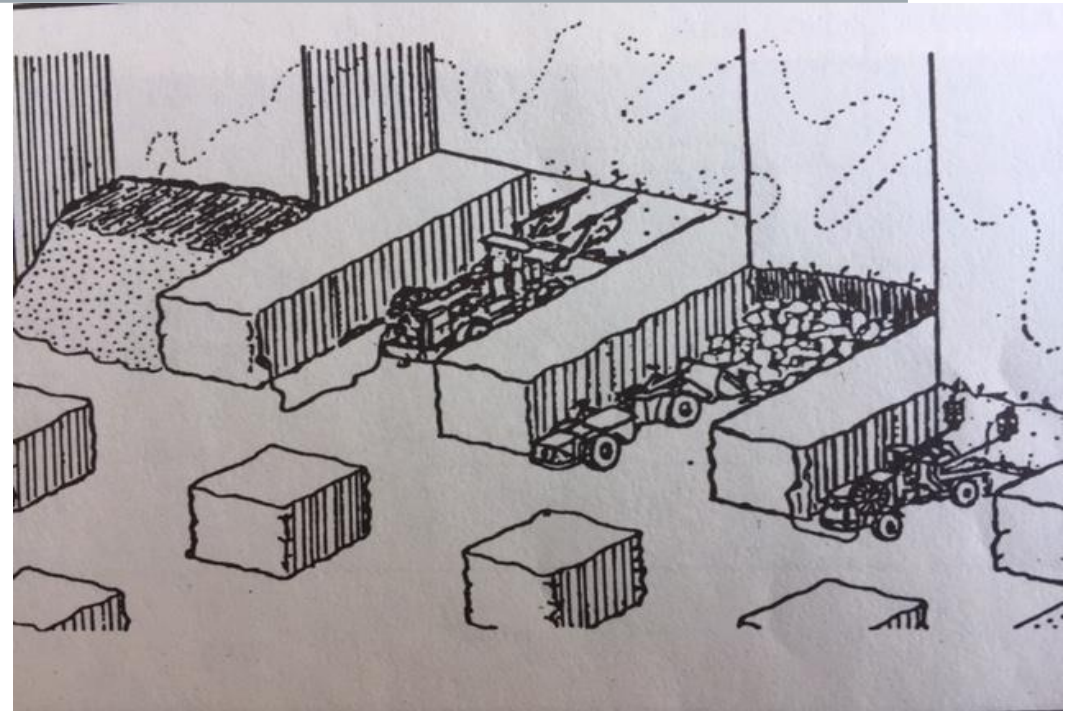
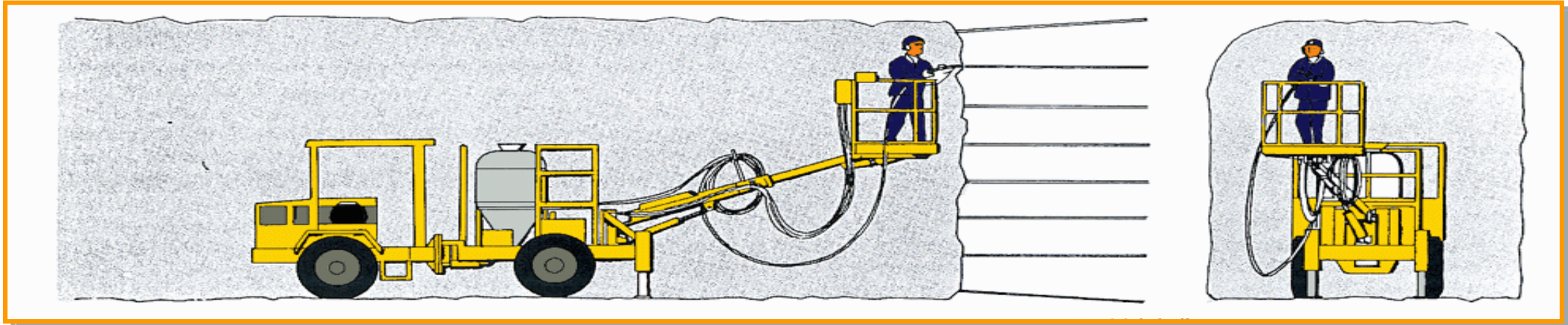


Condiciones Geológicas



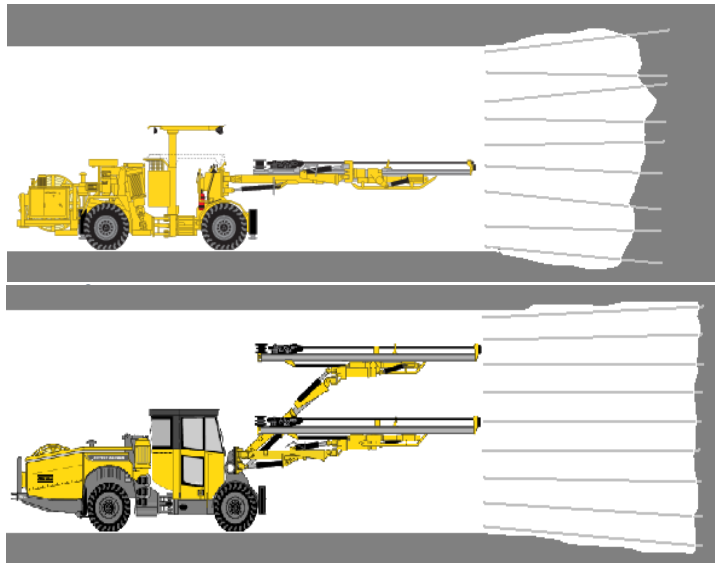
Diseño y explosivos

# Los Primeros Cargadores de Explosivos en Chile 1985



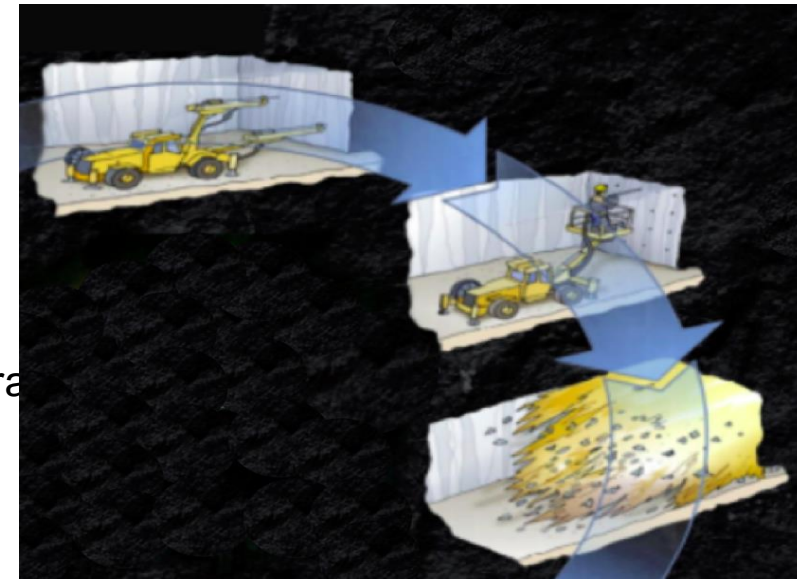
# Perfect Match; Perforación y Tronadura

## Importancia de la precisión de perforación y la calidad de carguío

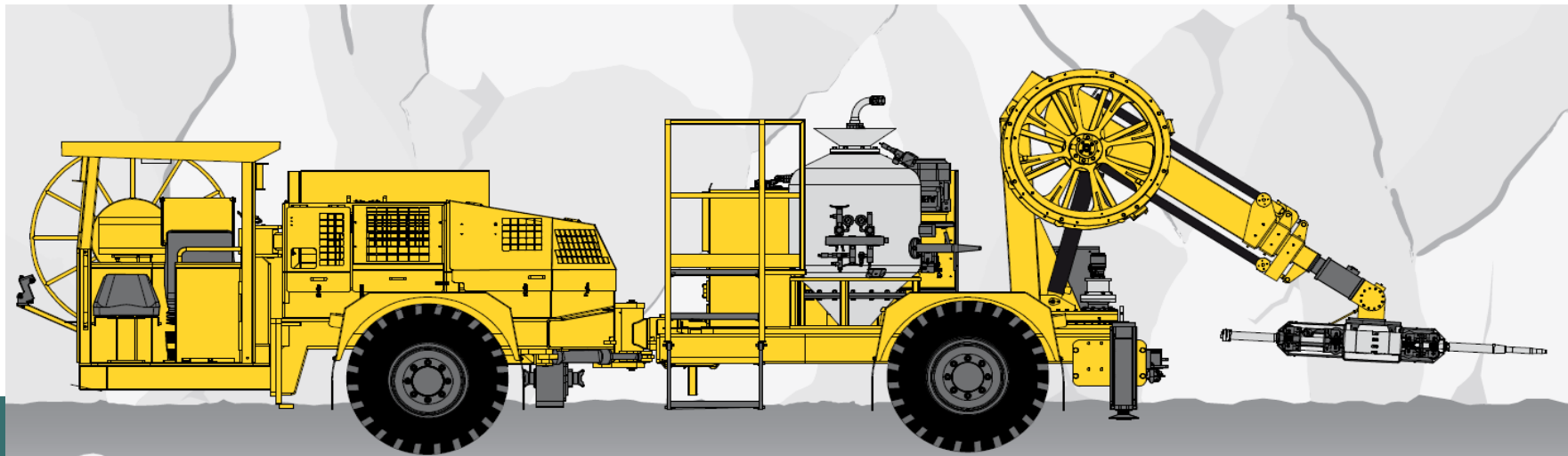
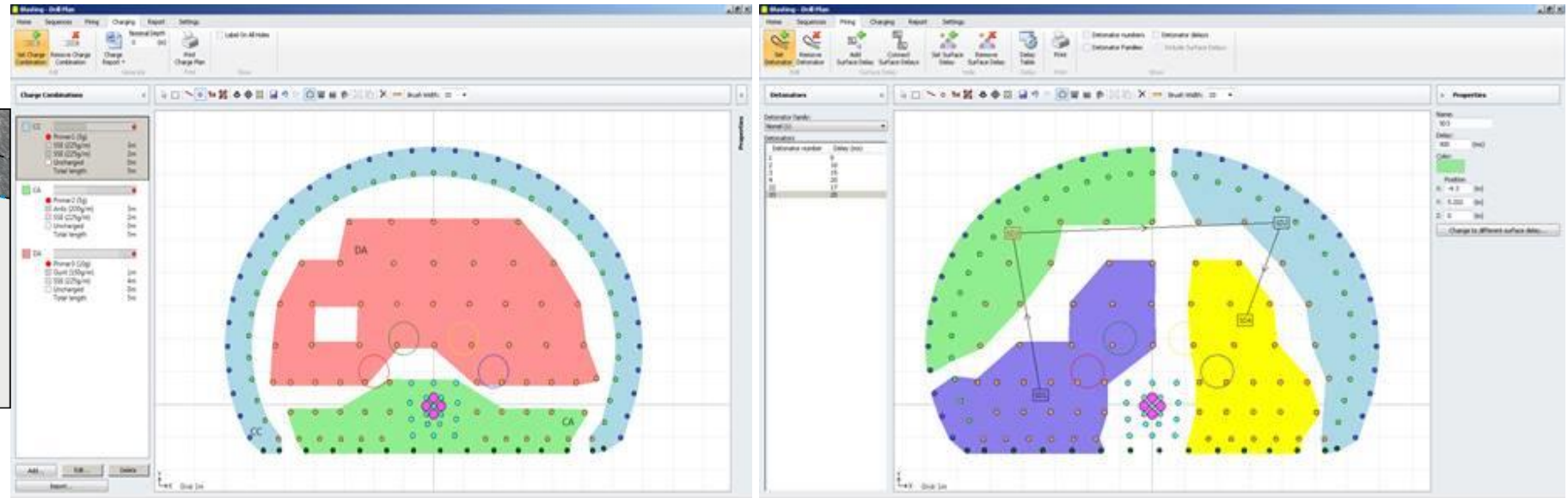
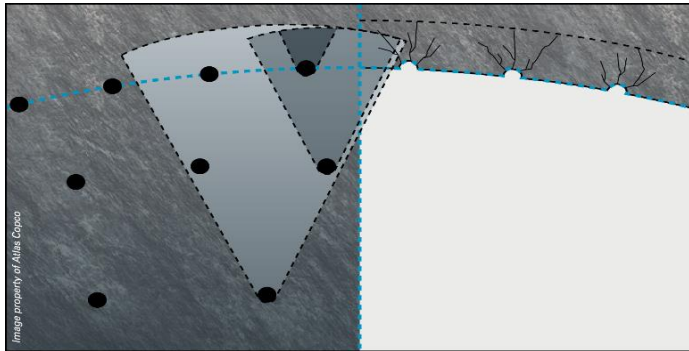


“Es difícil que una perforación inadecuada sea corregida por algún método de carguío de explosivos.

Pero una perforación precisa también puede ser aruinada por un diseño inapropiado debbb tronadura y una mala calidad de carguío”



# Emulsiones con diff.densidad de explosivos(minimizar daño a mazico rocoso) y sequencia de retardos de detonadores según bloques de barrenos

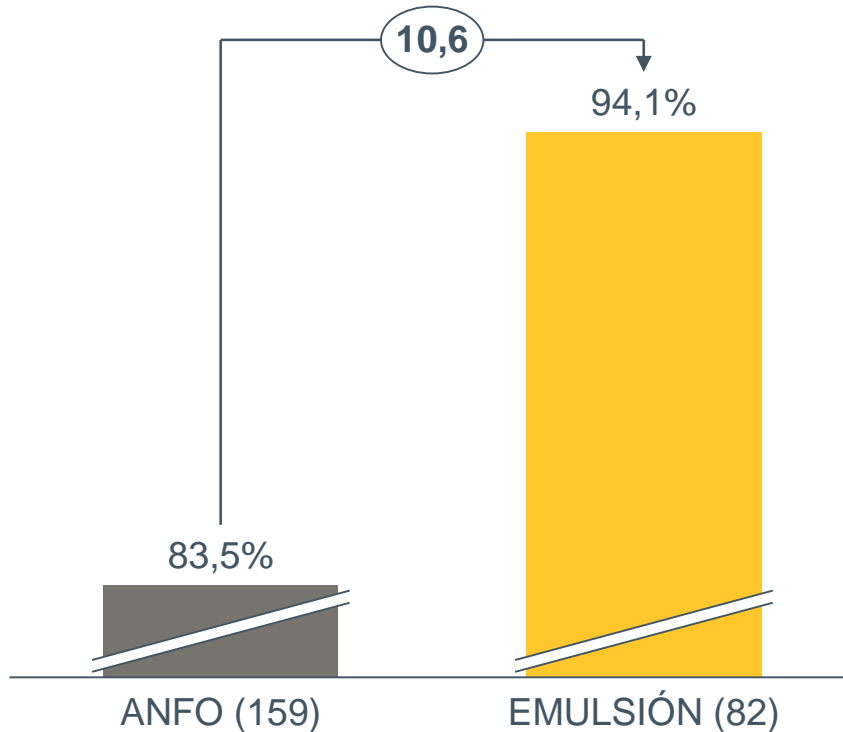


# Explosivos Emulsiones

## Implementación de emulsión (proyecto TTE)

Eficiencia disparos promedio

Metros lineales



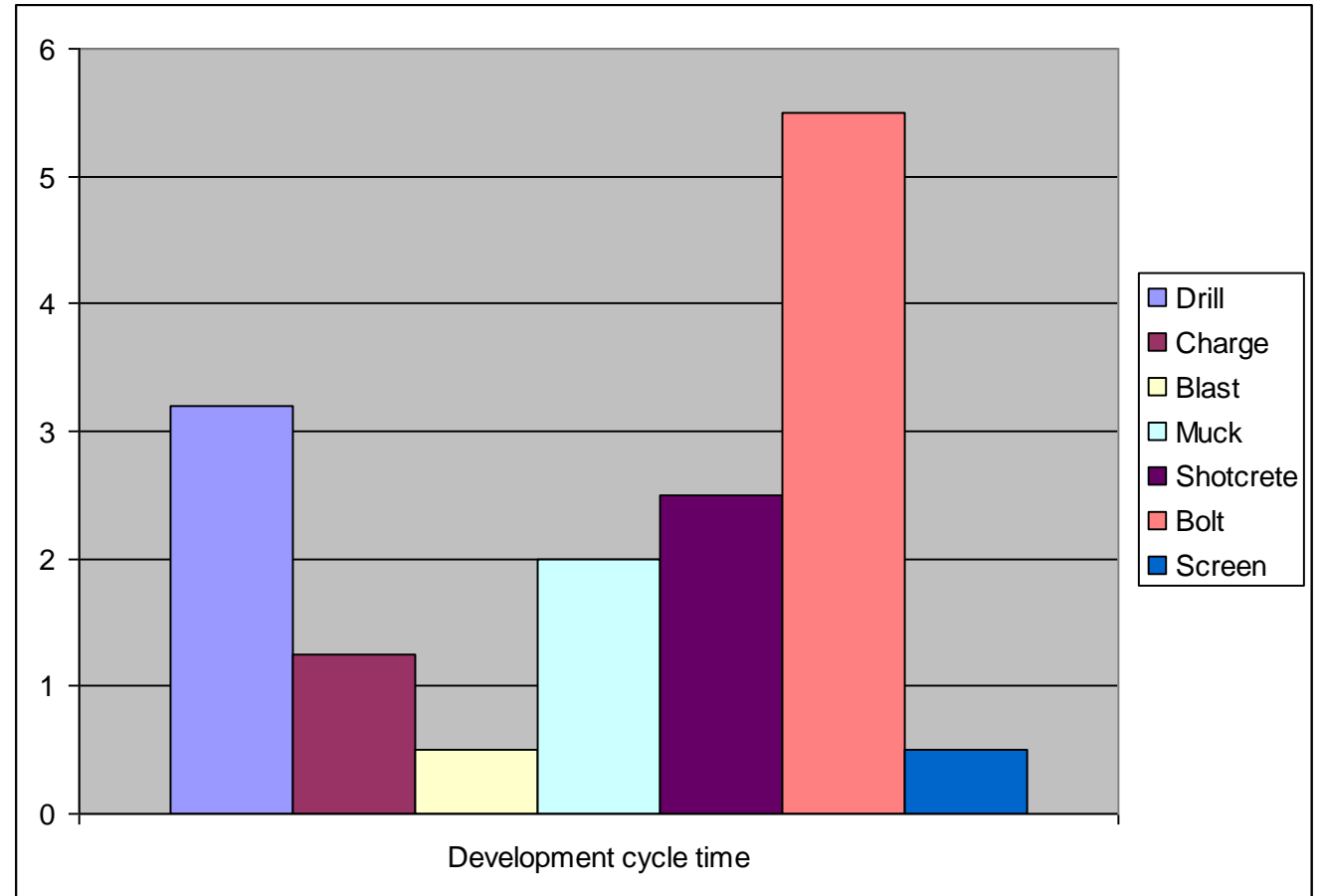
- Se evalúa la implementación del explosivo Emulsión durante los meses de marzo y abril, obteniendo 159 datos de avances francos (perforados a barra completa, sin restricciones) con ANFO y 82 con Emulsión
- Se mejora la eficiencia por disparo y se reduce el tiempo de ventilación en un 50% aproximadamente



# Fortificacion

## Desafios

- Empernado es un cuello de la botella en las operaciones de desarrollo de tuneles y galerias.
- Profundidad - aumento de estres y presiones de rocas
- Tecnicas tradicionales de empernado tienen limitaciones en malas condiciones de terreno
- Traditionally grouteado con cemento tiene largos tiempos de fragua



# Fortificación – Niveles de Mecanización

Manual



Manual bajo el techo protegido



Mecanizado (remoto)



# Fortificación Controlada



# TIPO de PERNOS

## Estáticos y Dinámicos

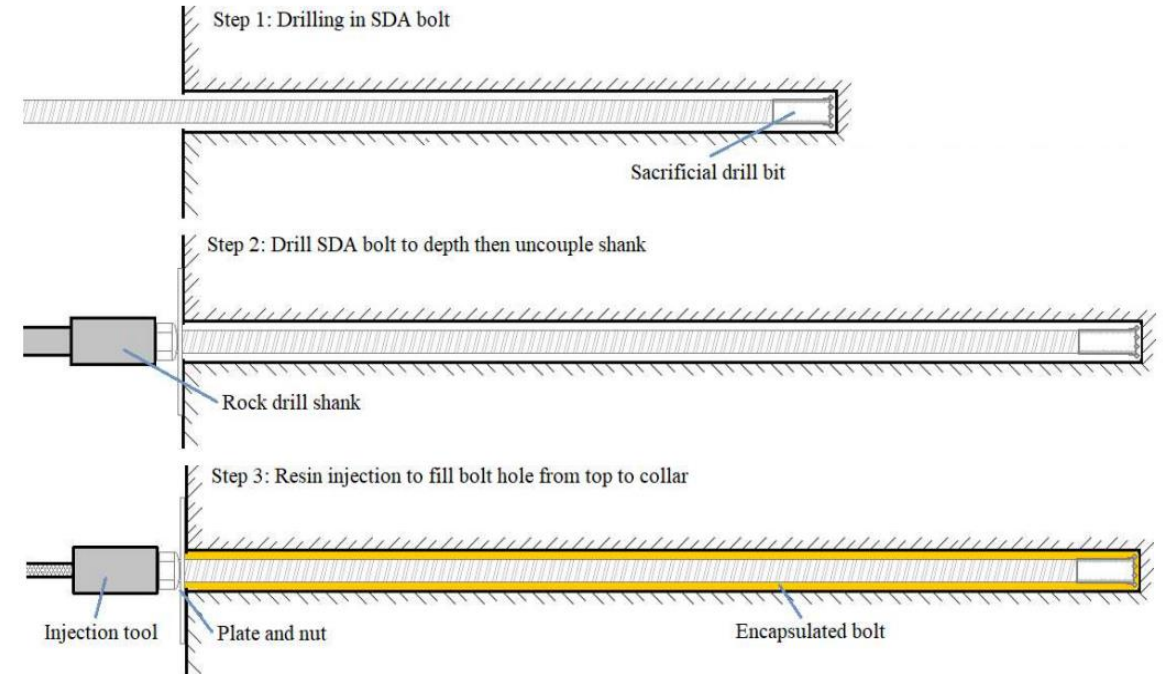
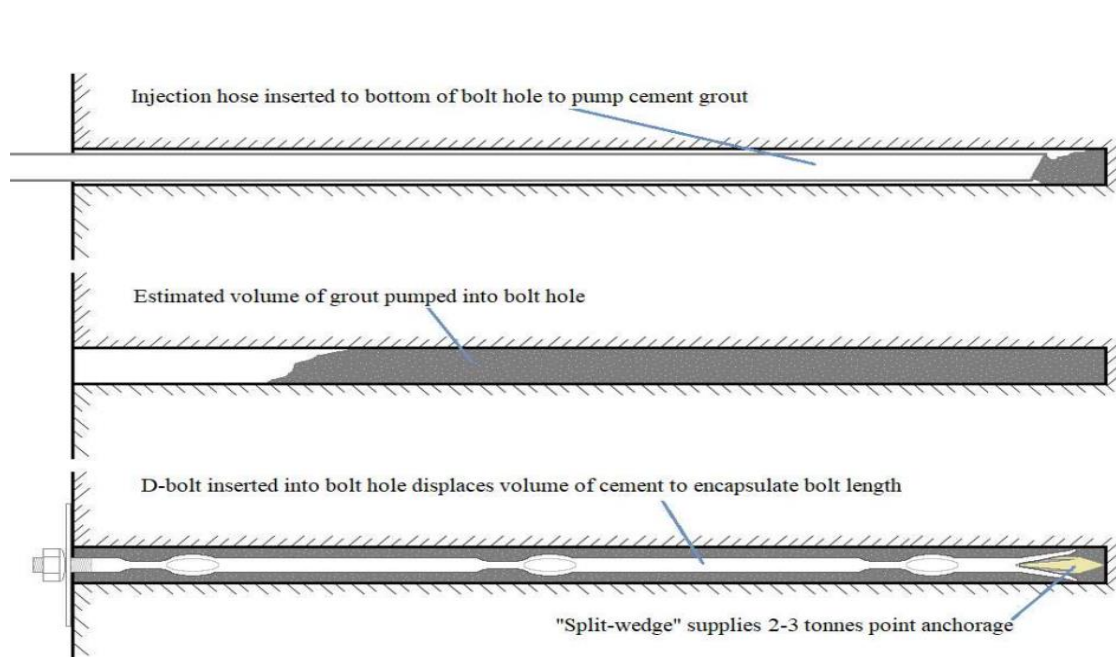
- Ejemplos de New Concept Mining/Epiroc



Detalle de los pernos de anclaje

Tipo de Perno	ØPerno (mm)	Ø (mm) Taladro	Componentes	Aplicación	Anclaje (ton)	Instalacion
Swellex	28 - 36 - 37	36 - 51	Inyeccion de agua	Corto y mediano Plazo	12 - 24	Boltec y manual
Hydrabolt	26 - 29	36 - 38	Inyeccion de agua	Corto y mediano Plazo	10 -14	Boltec y manual
Helixbolt	18 - 20	36 - 45	Resinas / Lechada	Corto y mediano Plazo	15 -25	Boltec y manual
Vulcan Bolt	20	40 - 45	Friccion	Permanente y Estallidos roca	15 -20	Boltec
Part 1 Bolt	16 - 18 - 20	36 - 45	Frccion / Lechada	Permanente y Estallidos roca	15 - 25	Boltec y manual
Mpa1	18 - 20	40 - 45	Lechada	Permanente y Estallidos roca	15 -20	Boltec
FOGLighth	40 - 47 - 53	38 - 53		Monitoreo convergencia		Manual
Helicoidales		19-22-25	Resinas / Lechada	Corto y mediano Plazo	15-25	Boltec y manual
Split Set		39.5 - 47	Friccion	Corto Plazo	4 -8	Boltec y manual
Auto perforantes		25-32-38	Resina liquida	Corto y mediano Plazo	15-20	Manual

# Innovación para Empernado en rocas duras: Perno autoperforable con resina bombeable, Incremento de productividad 65%.vs.grouteado (izq.). Pernos Dinamicos R28SDA, 34mm de diam, 3m de largo.



# Dispositivos de Advertencia

- *FOGLight / FOGStick*
- *Indicador de carga de cierre*
- *Proporciona advertencia al personal*

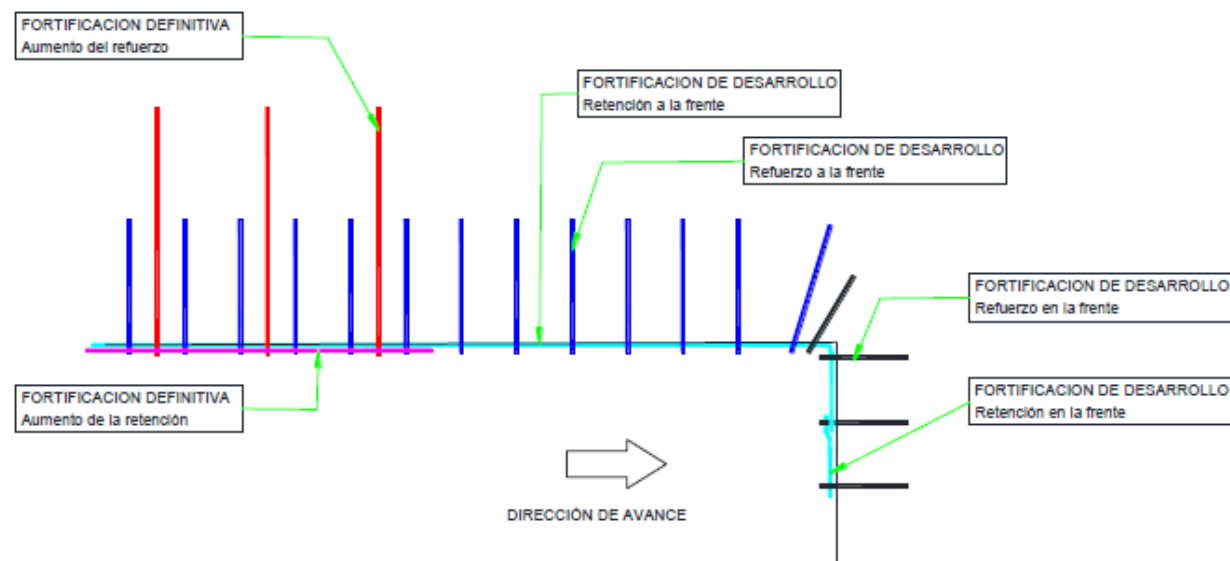
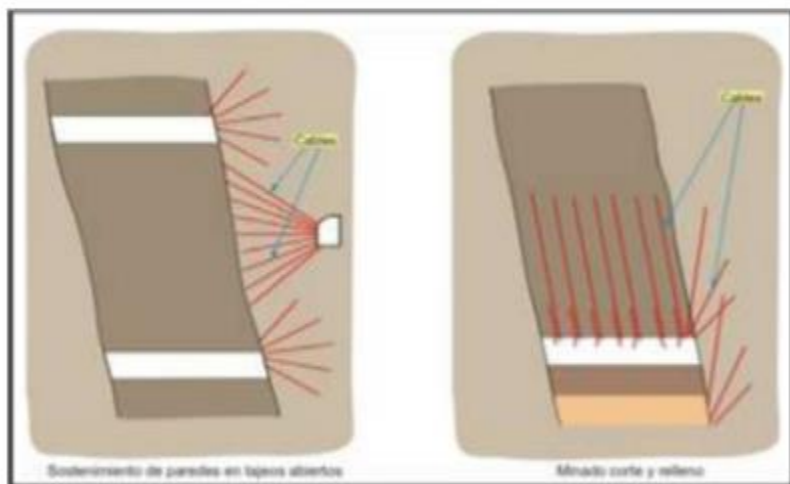
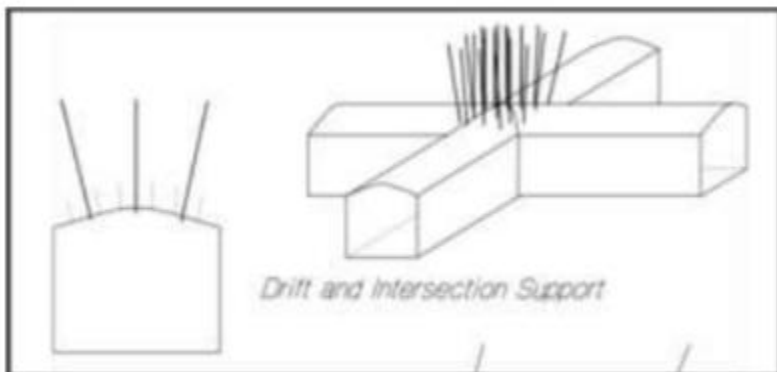
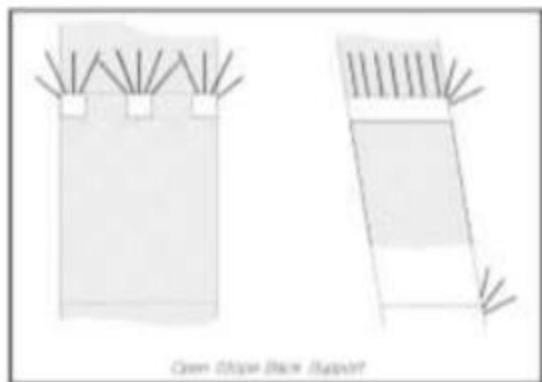


Monitoreo



Modo alarma

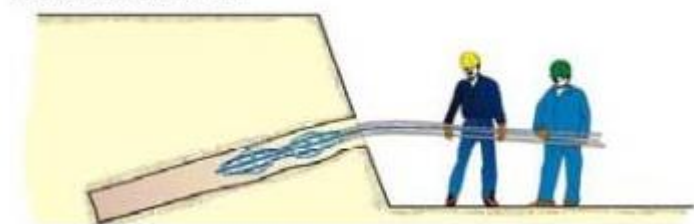
# Aplicación de Cableo



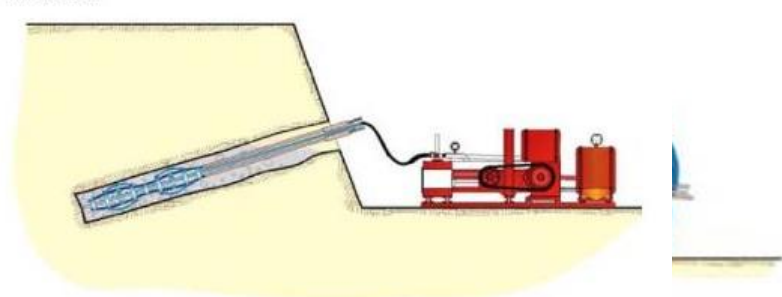
# Instalacion de Cables

## Manual vs. Mecanizado. Resultados prácticos TTE

3. COLOCACION DEL ANCLAJE



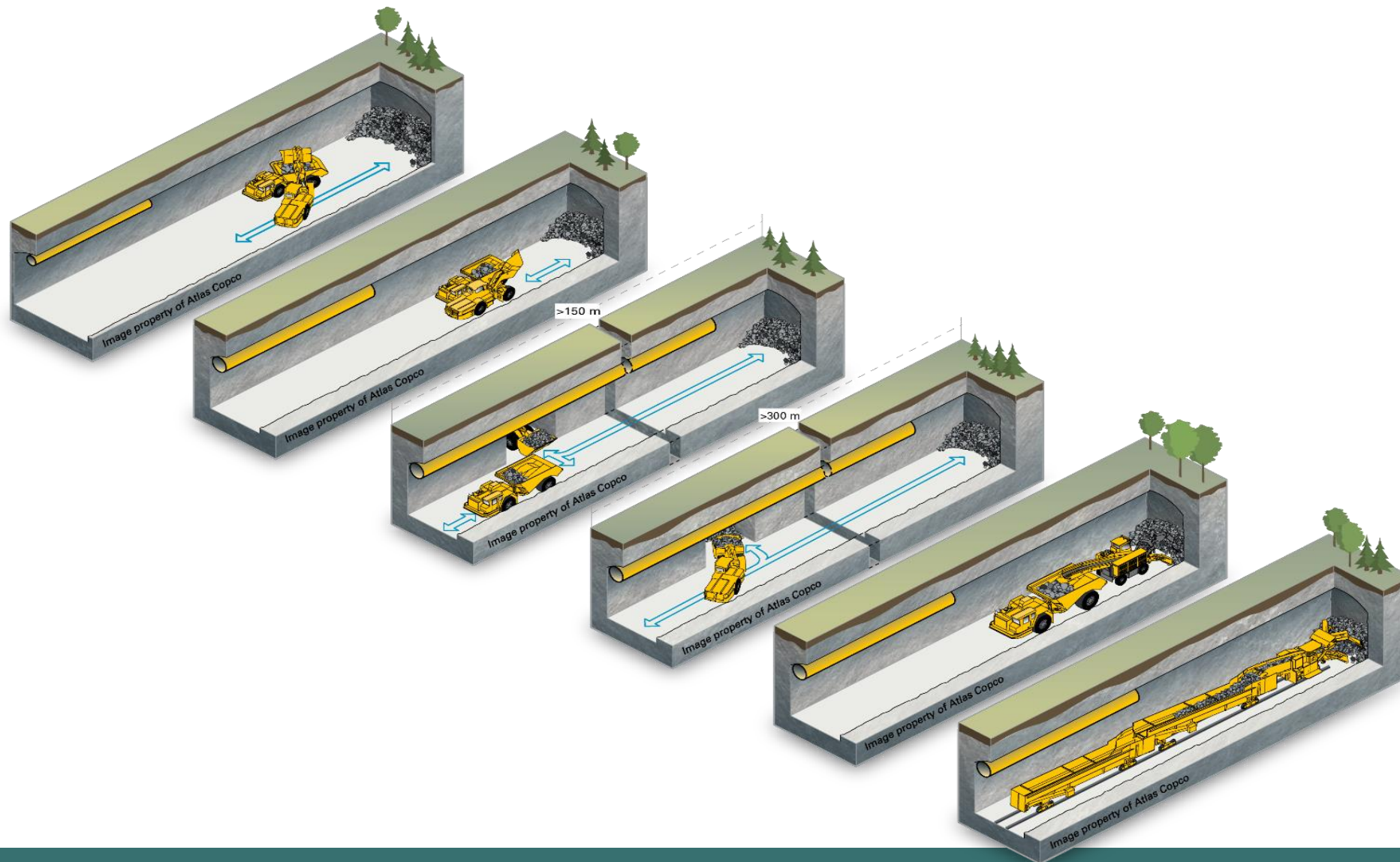
4. INYECCIÓN



ITEM	MANUAL	MECANIZADO
LONGITUD DE CABLE	11,0 mts	11,0 mts
NR. DE OPERADORES	5	2
RENDIMIENTO	11 m/hr	20 a 25 m/hr

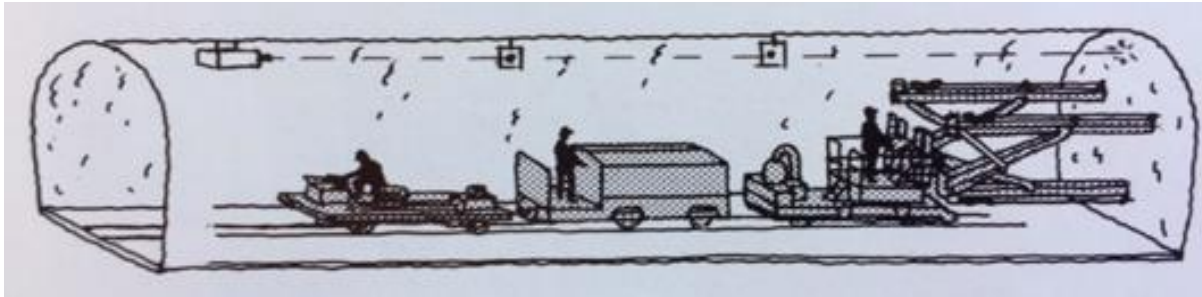


# Carguio y Transporte – Selección de Equipos vs. Sección y Longitud



# Tunel Lenca (Proyecto Canutillar- Chile)

## “High Speed Tunnelling”- All Electric en 1992!!!



“Metodo Noruego” Contratista Aceros Chile (Cartellone)

Largo 9,2km, seccion 3m x 3,4m, barrenos 3,5m de largo

Dos frentes con equipos iguales :

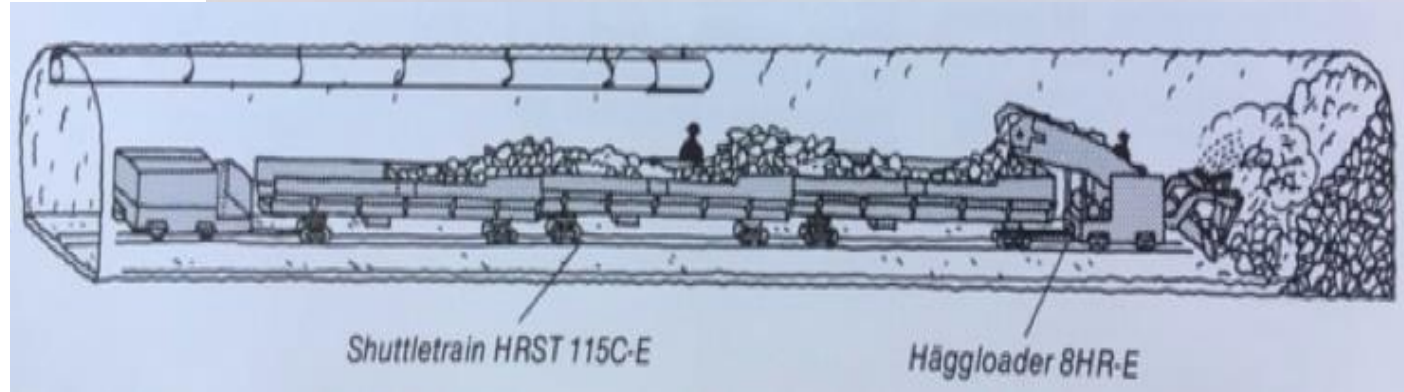
- Jumbo el. hidr de 2 brazos,
- Cargador 8HR con tres carros Heagglund 115,
- Loco de batteria.

Capacidad de carguío 120m<sup>3</sup>/hr

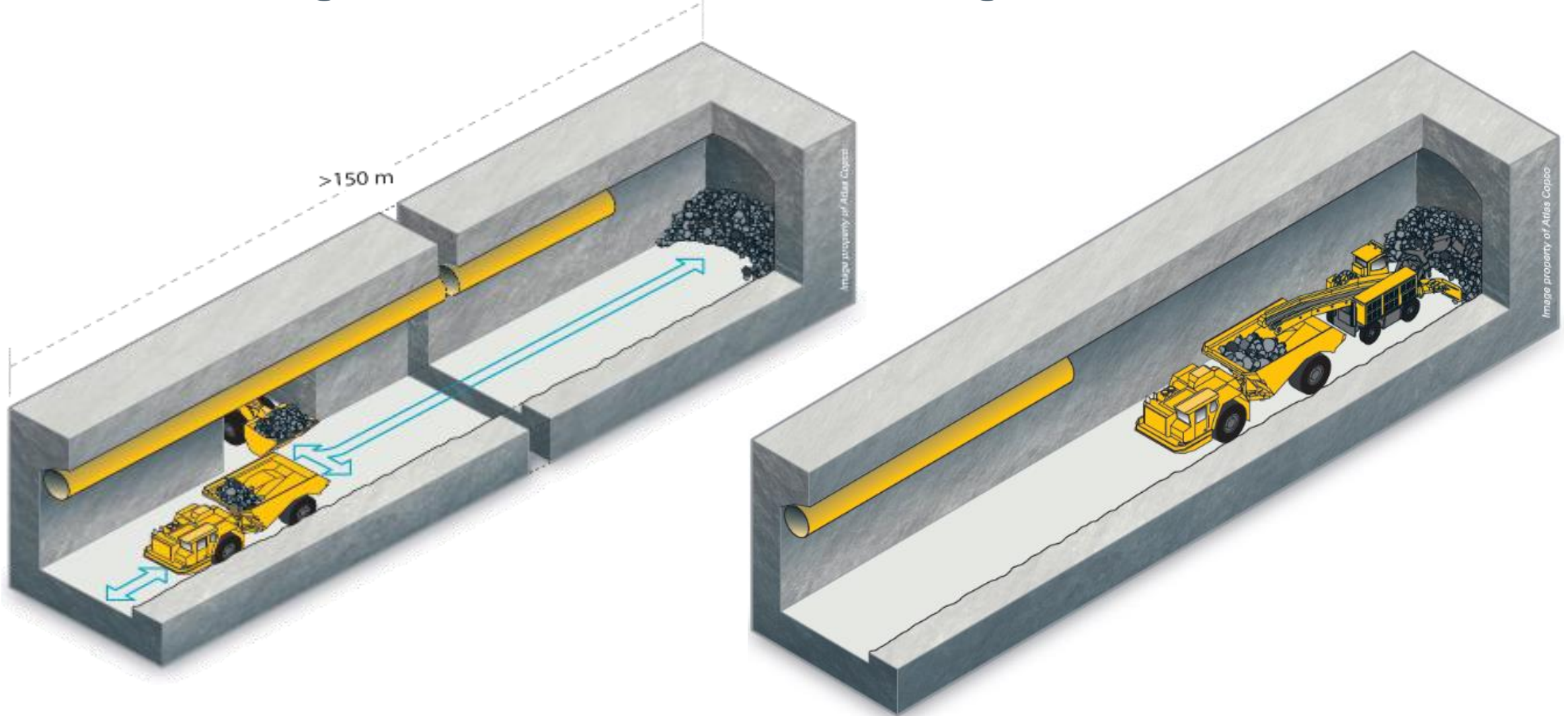
Operación: 24/7, turnos de 8 hrs.

Avance promedio: 650 m/mes de dos frentes

Max 450m/ frente



# Tuneles “angostos” < 6,0m: LHD vs Cargador Continuo



# Alternativa con Cargador continuo 10HR-B?

Ejemplo Noruega, tunel de 4,5x4,5 m, 20,5m<sup>2</sup>

## DATOS Y BENIFICIOS:

- Dos turnos de 8hrs
- Barrenos de 4,6m
- Mayor avance/mes (330m = 1 - 2 frentes)
- Menor req. de ventilación/ calor
- Menor nr. de estocadas

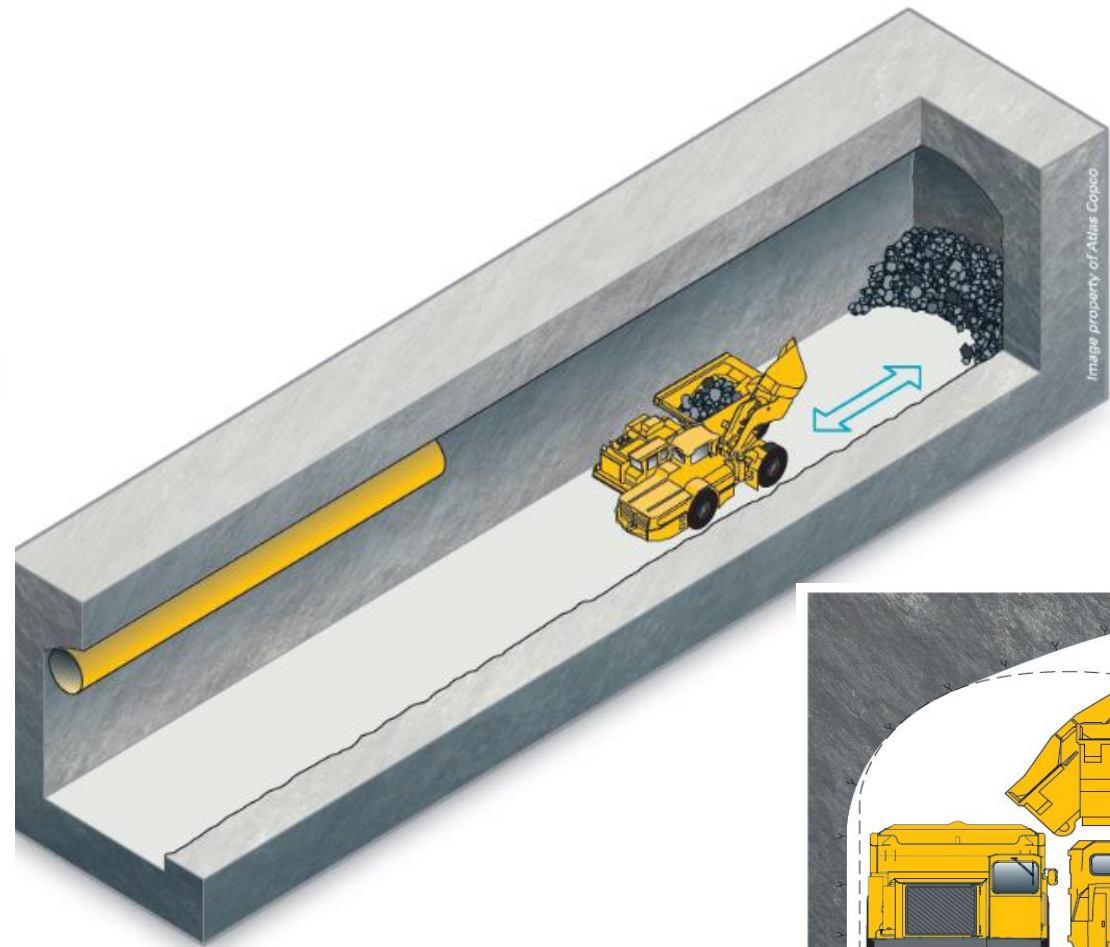
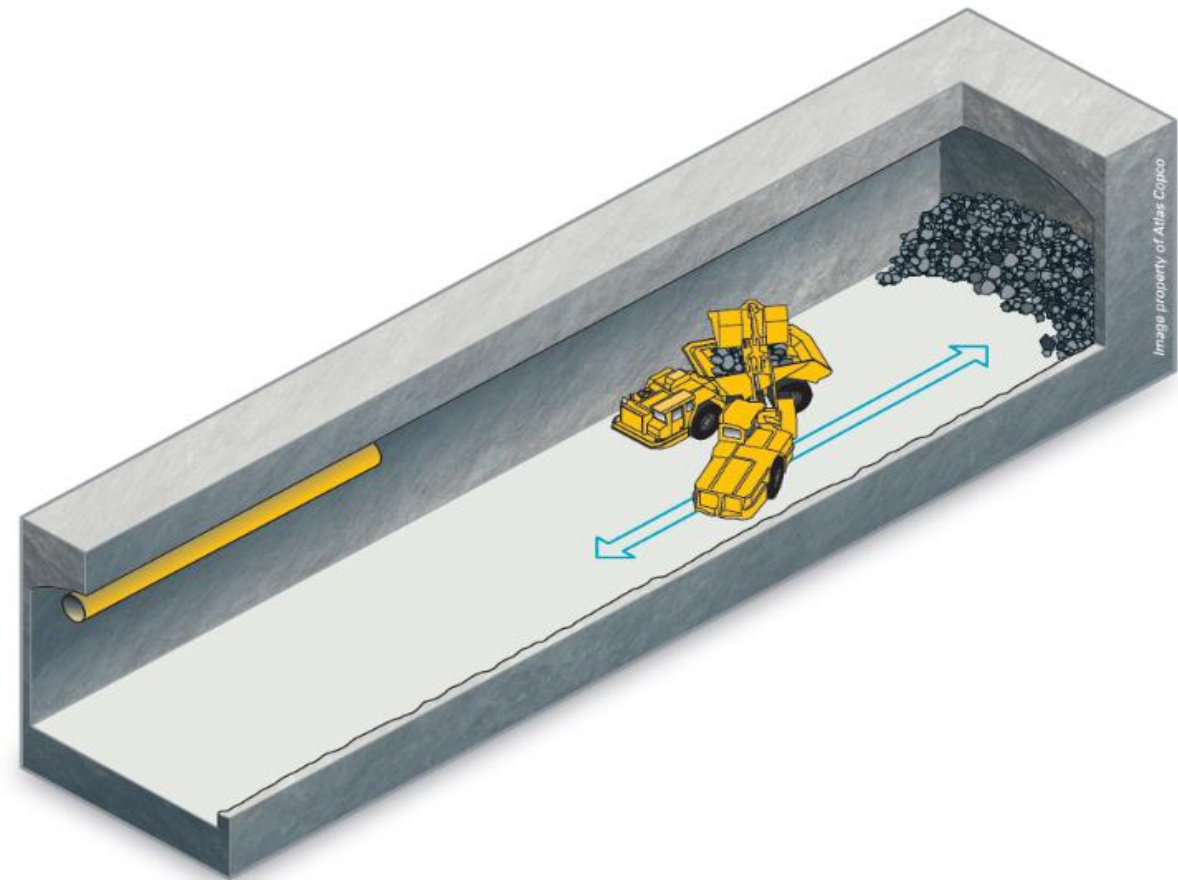
## Extra operaciones con 10HR:

- Acuñadura
- Manejo de bolones
- Limpieza del piso
- Control de polvo



# METODOS DE CARGUIO, TUNELES GRANDES

## Convencional (> 8m de ancho) o Side tipping (>6,5m)



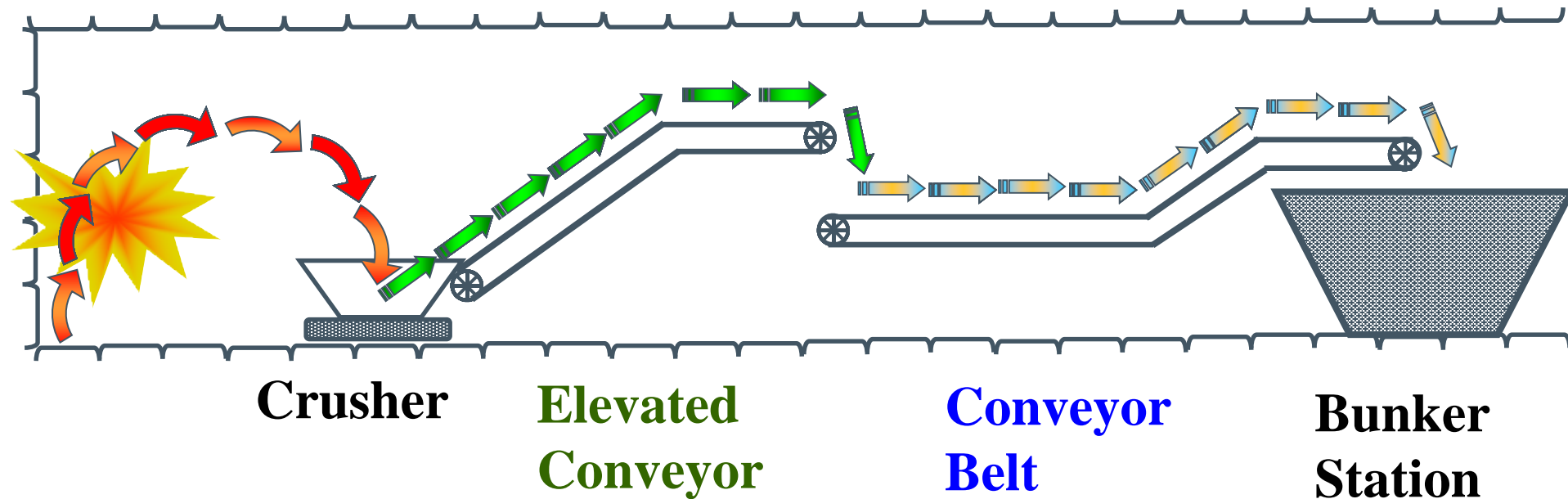
# CAMIONES MINEROS DE 60T VS. ADT 40T

- Largo del túnel de 4.360 m con rampa negativa de 15 %
- 35% menor nr. de camiones

Modelo	Tiempo (Pto. de carguio al portal) min	Velocidad (Km/Hr)	Consumo Combustible
		Cargado (15% negativo)	(Lts/Hr)
<b>Minetruck MT6020</b>	<b>23 a 25</b>	<b>11 a 12</b>	<b>38 a 41</b>
Caterpillar 740B	34 a 35	6 a 7	34 a 36
Volvo A40F	30 a 32	9 a 10	34 a 36



# Mucking Out Concept



# BEV, ELECTROMOBILIDAD – Una Revolución Silenciosa





# KEY BENEFITS IN MINING OPERATIONS

- Environment and health (Zero emissions)
  - Stage IV engine after treatment systems vs. battery
- TCO & lower expenses due to
  - Less energy needed (up to 80%)
  - Energy recovery during braking/downhill
  - Less need for ventilation and cooling
- Better performance in uphill tramming due
- Better productivity via longer service interv
- Less noise



	Diesel vehicle fleet	Fully electric vehicle fleet	Difference (%)	Savings per year
Installed ventilation capacity (kW)	10 500 kW	5 800 kW	-44,8 %	
Installed cooling capacity (kW)	7 100 kW	3 400 kW	-52,1 %	
Total (kW)	17 600 kW	9 200 kW	-47,7 %	5,05 M€

# Aplicaciones en Tuneleria

ST7B (Battery) Prueba en mina Ayacocha – Peru 2018



Polimetalica, 1400tpd

Aplicacion: Tunnel de integración, carguio directo al camion

**Resultados** de la prueba con ST 7B:

Sin problemas en altura (**3900m** asl.)

**Reduccion de calor - 80%**

**Tiempo de funcionamiento de bateria 4-4,5hrs**

**Cambio de bateria 10 a 15min**

**Costo dee carguio de bateria/ year (2160hrs) = 5.322**

**USD vs. costo of petrolio /year = 46.630 USD/unidad.**

Flota total de LHD´s: 4 x 7t & 5 x 10t

# Ventilation on Demand in Tunnelling (VoD), Serpent Automation System

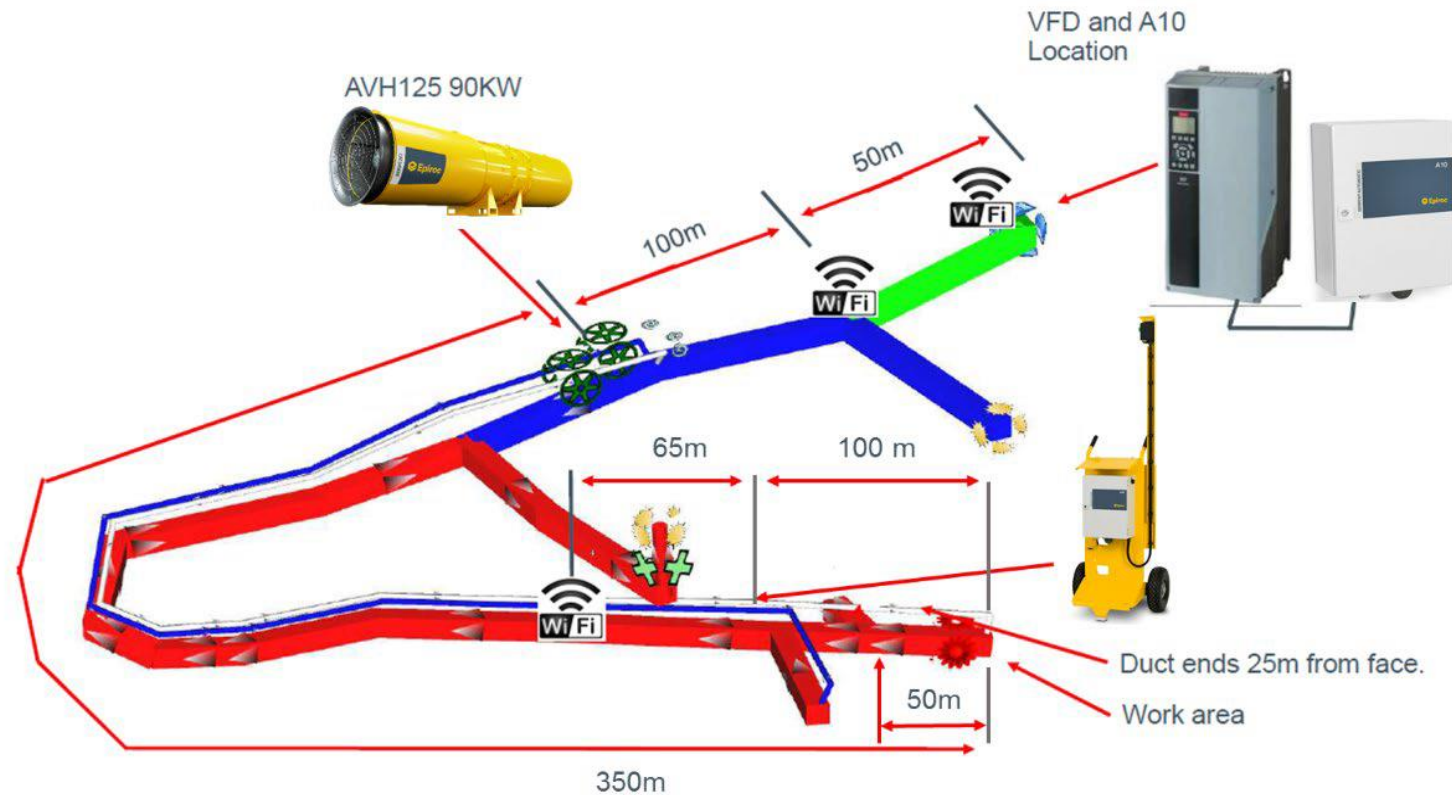
VoD Ventilation project (testing Serpent Automation System)

RAMP at 750m depth: 650m long (15%), 5m x 5,5m

Typical eq.; drill, scaler, bolter, loader & truck  
One single heading, 1 single fan (AVH 125, 90 kW).  
Designed for tunneling operations based on air quality monitoring - CO & NO2 emissions and controlling fan speed.

## RESULTS:

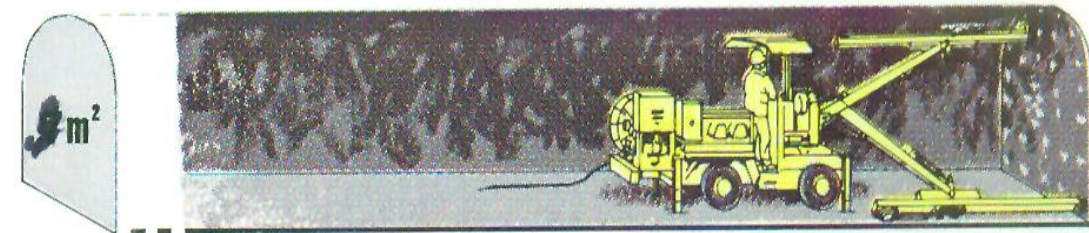
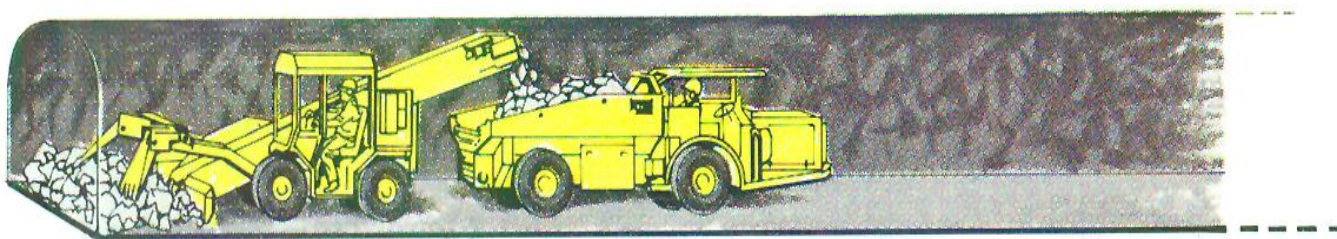
**13%** reduction in power consumption when operating 50% manually & 50%  
In automatic mode **47%** reduction when 98% automatic operation.



# FUTURO DESARROLLO DE TUNELES

## “All Electric” y Computarizado

- Perforación, carguío de explosivos y fortificación automatizados
- Cargador electrico LHD/F&L o continuo, Camion a bateria,
- Ventilacion s.requierimiento, Menor sección del túnel (minería)
- Comunicación/Control on line = Max. Seguridad y Productividad



# Bibliografía

1. Zablocki.A. Controlled Excavation of Drifts and Tunnels – Key point in the economic Operation. Atlas Copco PrintedMatter 1986.
2. Darling.P. High speed tunnelling through the Chilean Andes. Tunnels & Tunnelling 1992
3. Underground Construction. Atlas Copco Guide Book, first edition 2015
4. Zablocki.A. Desarrollo de tuneles – Pasado, Presente y Nuevas Tecnologías. Presentacion Universidad Catolica, Diciembre 2018
5. Hanssen.J. Well-Matched Equipment Makes a World of Difference.World Tunnelling Conference Sao Paolo 2014
6. Zablocki.A. Fortificación Mecanizada, Tunneltek Santiago 2019
7. Cortes.Zablocki.S. Análisis de la Implementación del Control Computarizado en la Perforación para Desarrollo Horizontal. Memoria UCH 2019
8. Bray.P. Johansson.A. The Search to Find A Better Solution for Mechanized Bolting in Difficult Rock Conditions. Epiroc/LKAB 2020