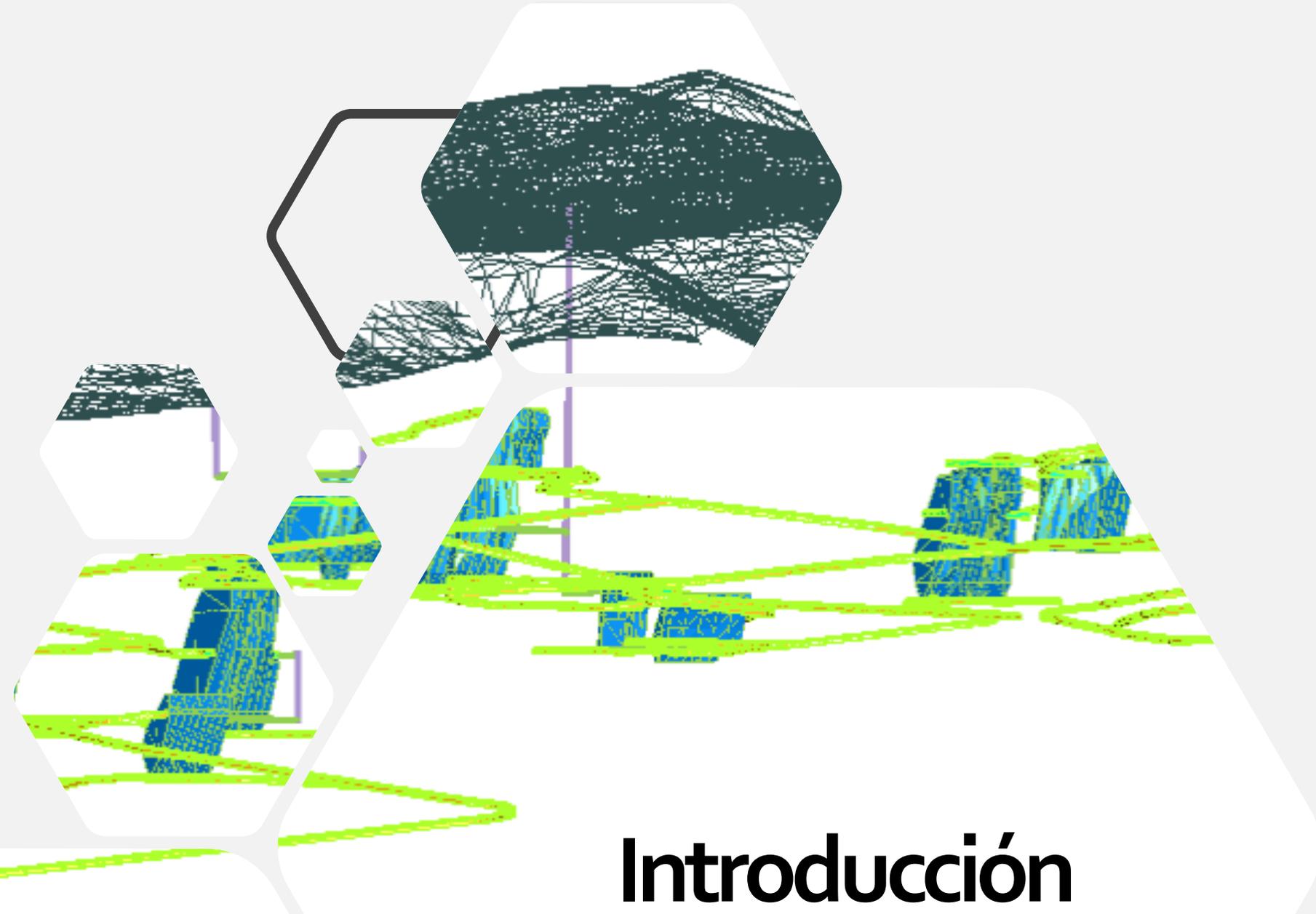


**OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE SUBLEVEL
STOPPING**

LUIS ALVAREZ PAREDES
NUBE MINERA





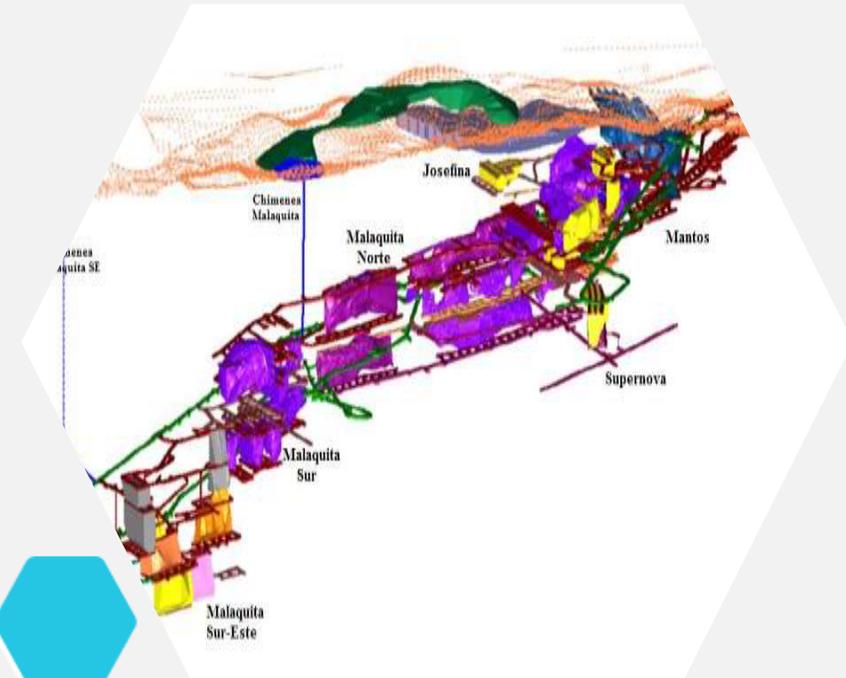
Introducción

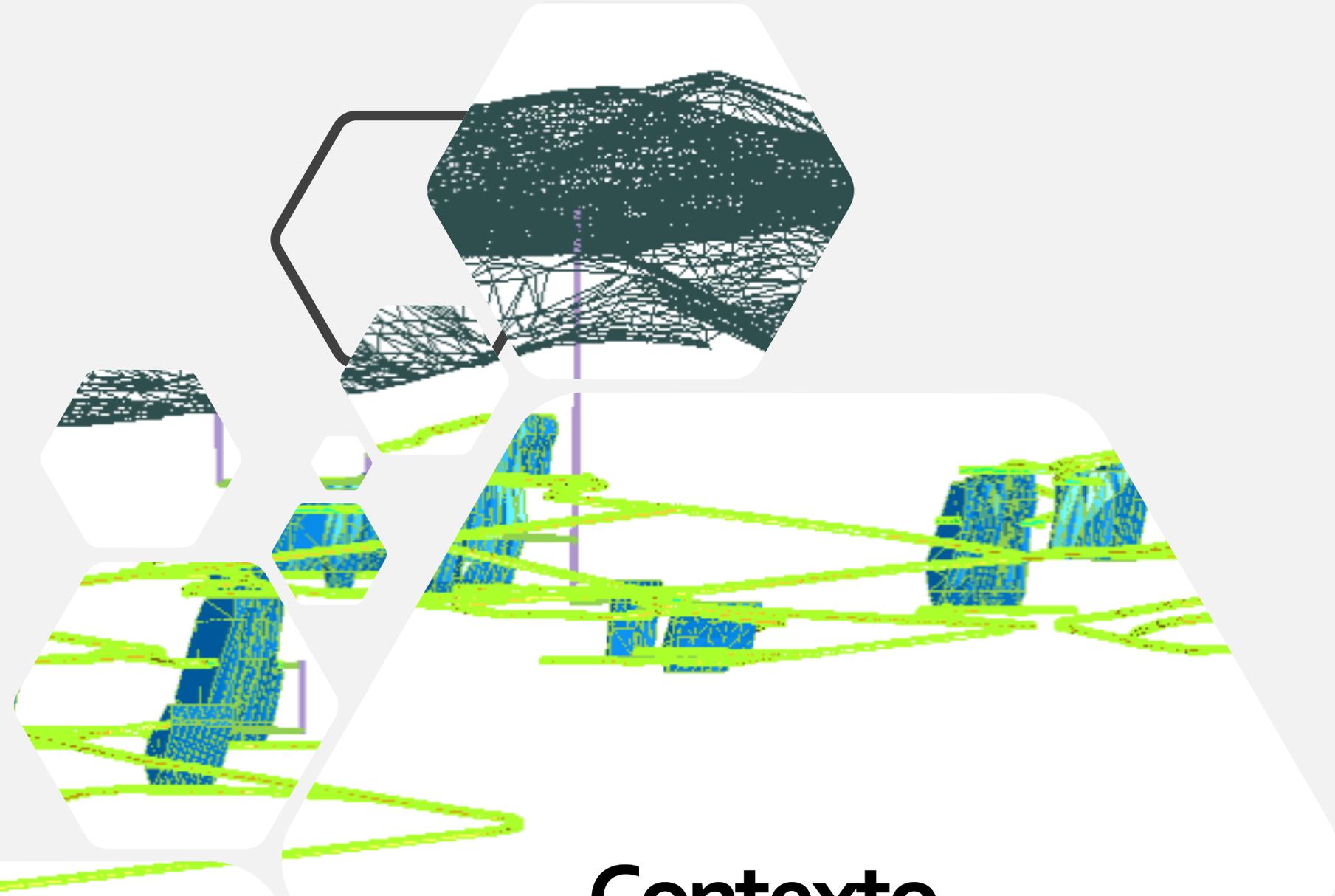
Objetivo General

Generar e implementar un modelo heurístico para obtener el diseño óptimo en un proyecto minero subterráneo de Sub Level Stopping, considerando las restricciones geomecánicas reflejadas en el tamaño máximo de caserón y tamaño mínimo de pilares y términos económicos, con el fin de obtener la configuración de caserones y pilares que maximice el beneficio total del proyecto.

Objetivo Específicos

- Implementar el modelo heurístico en el lenguaje de programación Python en la plataforma de Spyder.
- Preparar los modelos de bloques para ser importados a la plataforma Spyder.
- Generar diseños manuales para casos de aplicación.
- Generar los diseños que son resultados del modelo
- Comparar los resultados del modelo respecto a diseños manuales de caserones y pilares.





Contexto



Minera Subterránea

La minería subterránea consiste en un conjunto de excavaciones que tienen como fin acceder a los sectores mineralizados que se encuentran en la profundidad del macizo rocoso y extraer el mineral para posteriormente procesarlo y comercializarlo en el mercado, con el propósito de generar utilidades a los accionistas de la empresa. Según Hartman, los métodos de explotación subterráneos se pueden clasificar en tres grandes grupos, auto soportados, con relleno y caving (Hartman, 2002)



Minera Subterránea

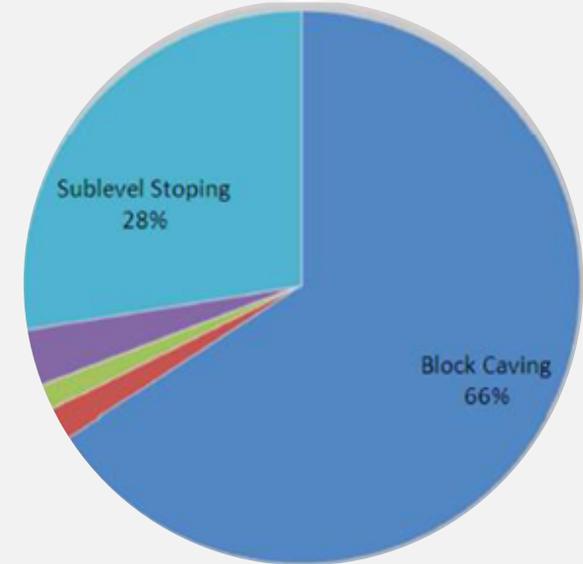
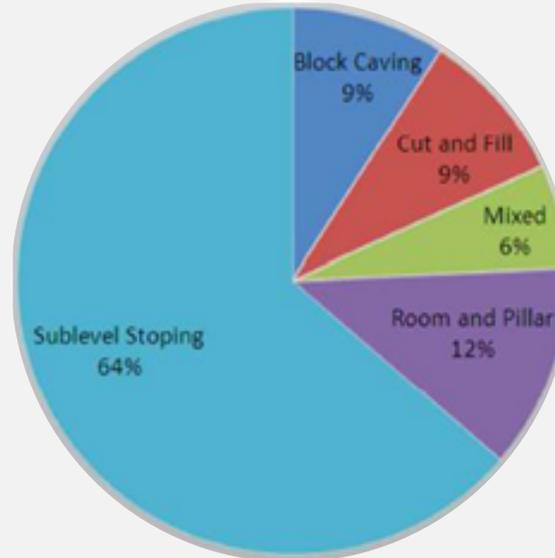
De la producción mundial de metales, el 20% corresponde a operaciones subterráneas. De ese total un 20% es generado en Chile, siendo el país que mayor producción alcanza por métodos subterráneos (Zablocki, 2013).

En Chile, la mayoría de las operaciones subterráneas aplican el método de sub level stoping las tasas de producción son de alrededor de 1.5 Mt/año.



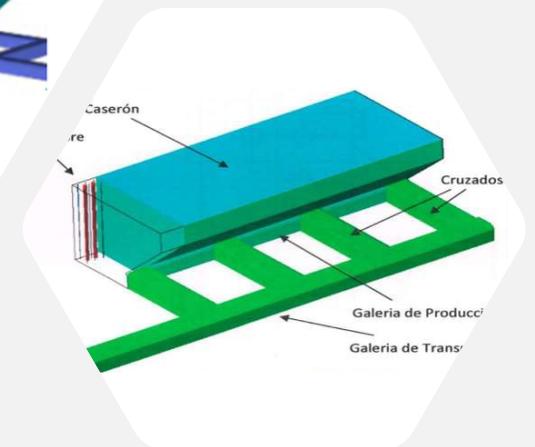
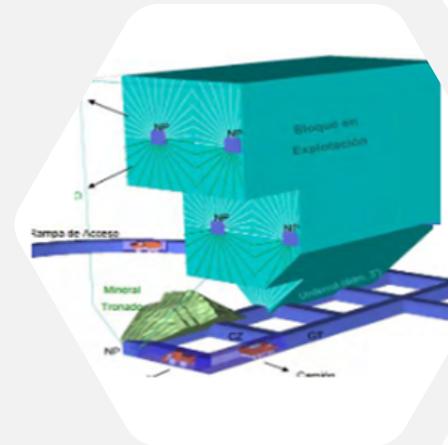
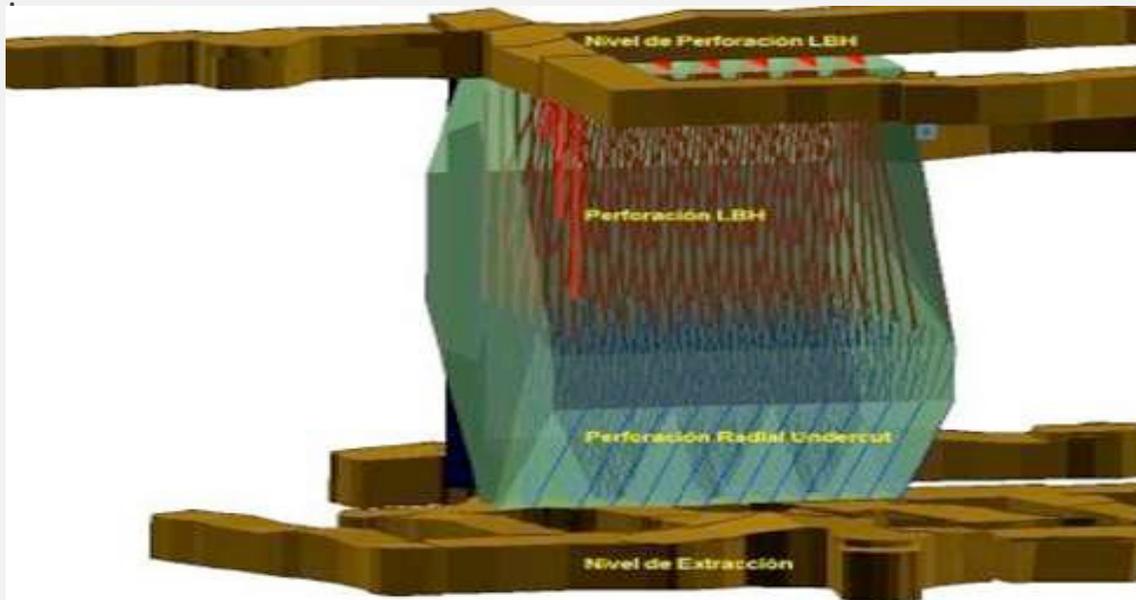
Operaciones de Sub Level Stoping en Chile

- Candelaria Norte
- Atacama Kozan
- Punta del Cobre
- Granate
- Santos
- Alcaparrosa
- SCM Carola
- Las Cenizas
- Cabildo



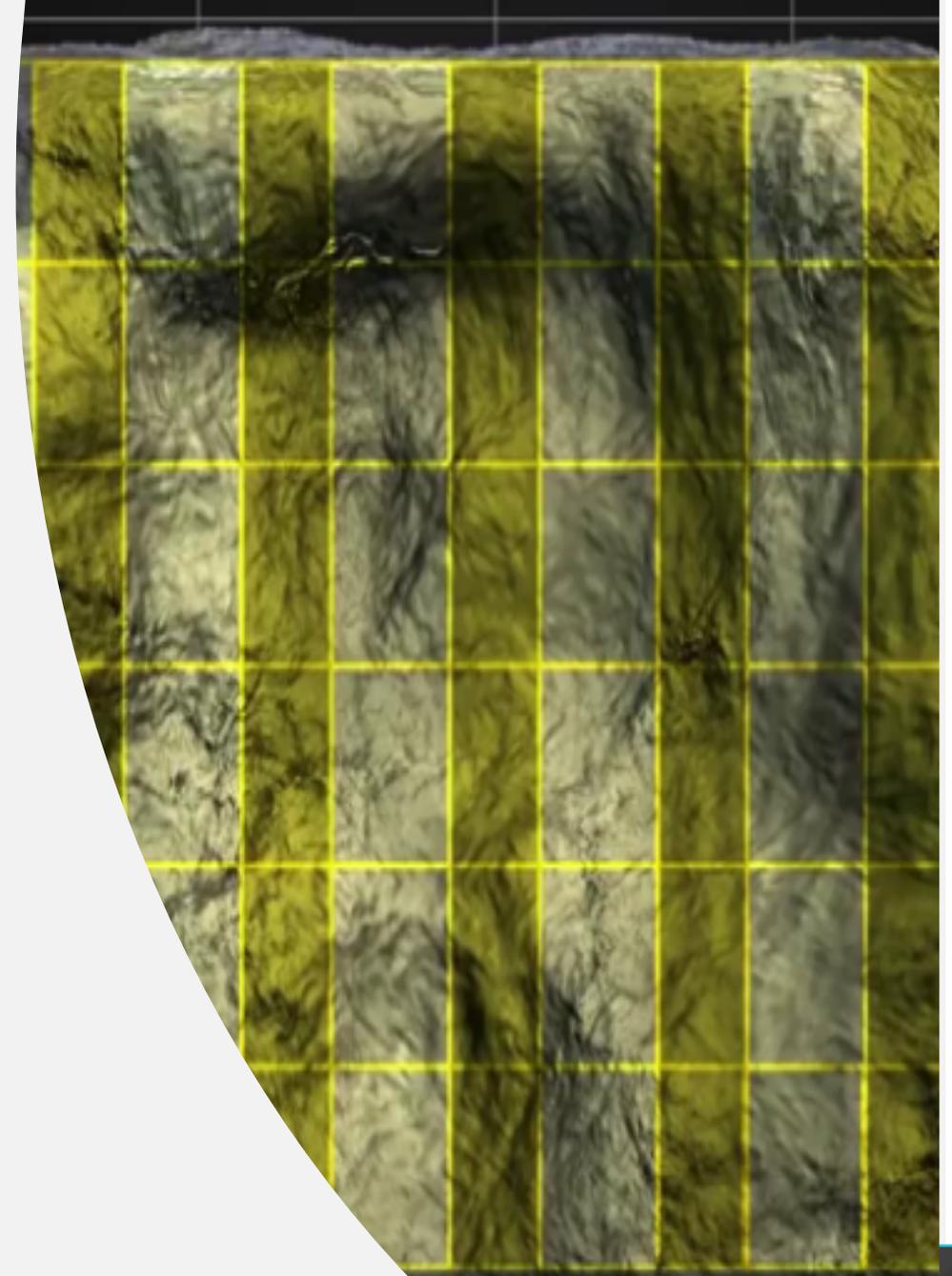
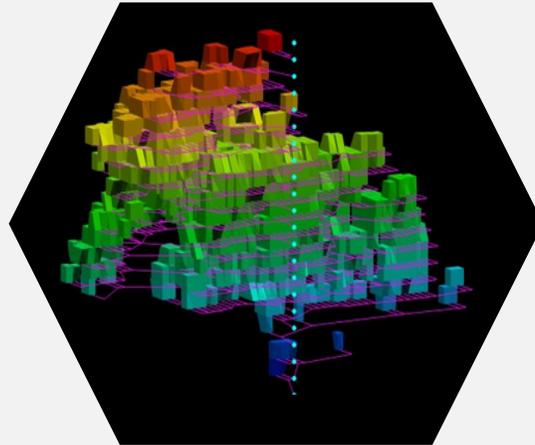
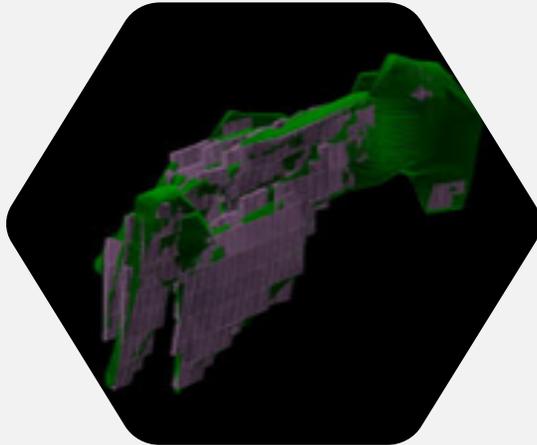
SUBLEVEL STOPING SIN RELLENO

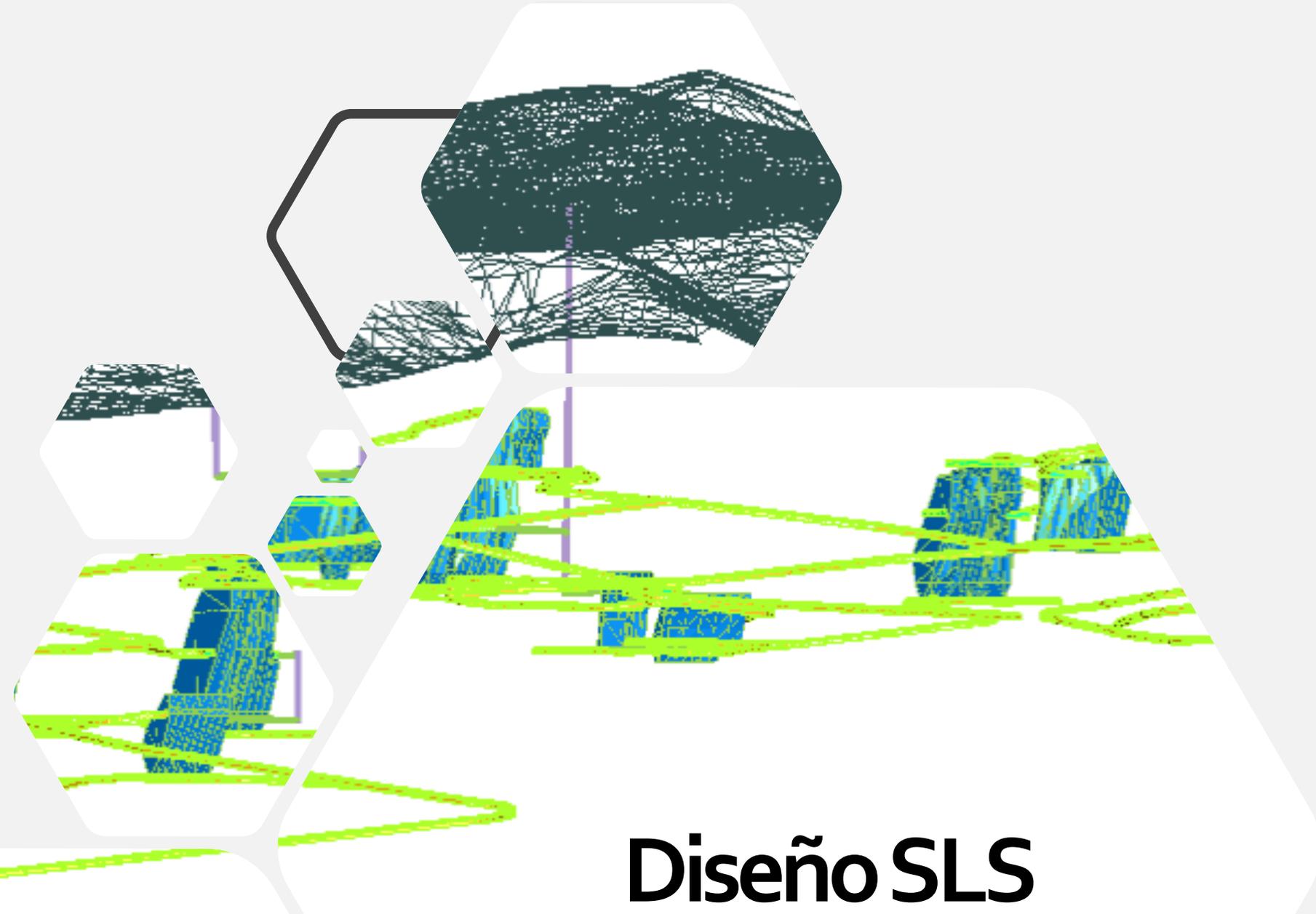
Esta variante del método genera caserones los cuales están separados por pilares tanto verticales como horizontales. La recuperación minera que se define como el porcentaje de mineral que se extrae del yacimiento es diverso. La recuperación de las reservas en cuerpos masivos es cercana a un 50%, en casos de cuerpo tabulares puede llegar a un 60%. Estas versiones sin relleno se caracterizan porque los caserones en la parte base consideran la presencia de una zanja.



SUBLEVEL STOPING CON RELLENO

Corresponde al método más utilizadas a nivel mundial y se caracteriza por que los caserones son de menores dimensiones respecto a las versiones sin relleno. Además no considera la presencia de la zanja en la parte inferior del caserón. En estas versiones del método se logra recuperaciones del yacimiento que rondan el 90%.





Diseño SLS

Diseño de Minas Subterráneas

El diseño de minas subterráneas es una etapa importante en el proceso de planificación de un proyecto minero. En esta etapa las reservas mineras se convierten en reservas minables, consideran la recuperación minera y dilución (Sandanayakeet al., 2015).

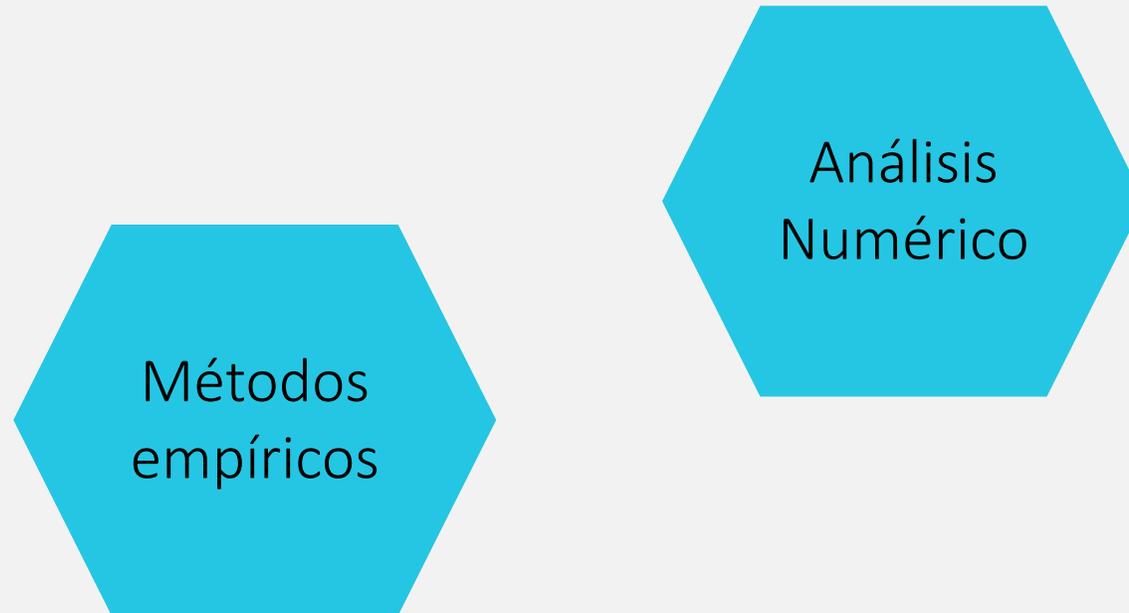
El diseño de una mina subterránea es conceptualmente más difícil que el caso de minas a cielo abierto, ya que se deben tener presentes parámetros económicos, operacionales y geomecánicos con el fin de maximizar el beneficio global del proyecto minero subterráneo (Sens, 2011).

El diseño global de un conjunto de caserones y pilares de una mina de Sub Level Stopping es una labor que no ha sido definida con mucho detalle en la literatura. Los caserones son definidos como unidad básica de explotación (UBE). Los caserones de las versiones que no consideran el relleno de las cavidades no corresponden a prismas rectangulares, sino que en la base consideran una zona de zanja o batea.



Diseño de Sub Level Stopping

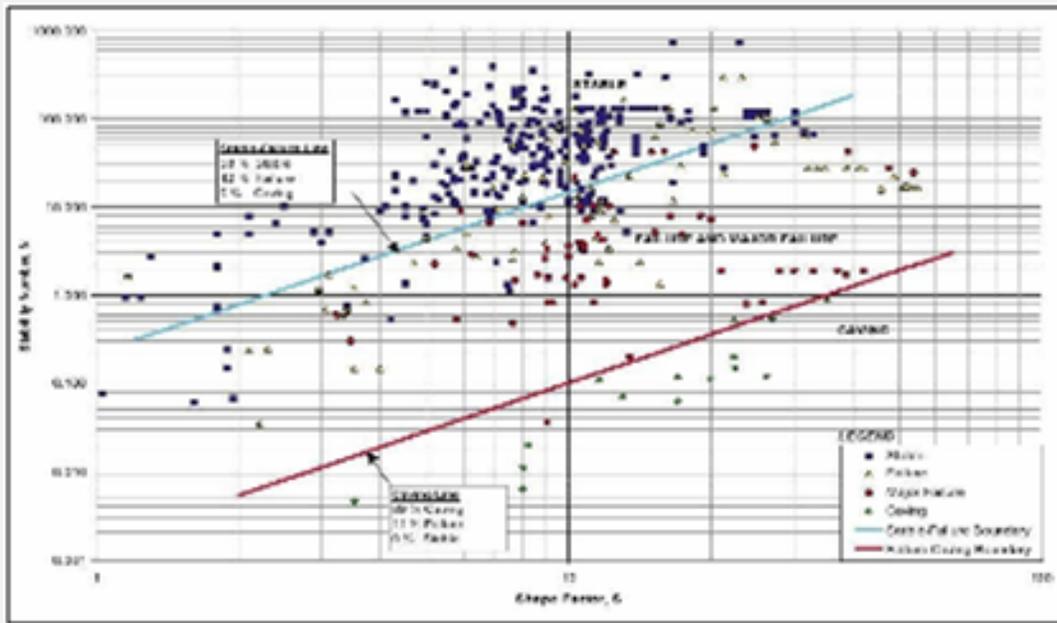
El diseño global de un conjunto de caserones y pilares de una mina de Sub Level Stopping es una labor que no ha sido definida con mucho detalle en la literatura. Los caserones son definidos como unidad básica de explotación (UBE). Los caserones de las versiones que no consideran el relleno de las cavidades no corresponden a prismas rectangulares, sino que en la base consideran una zona de zanja o batea.



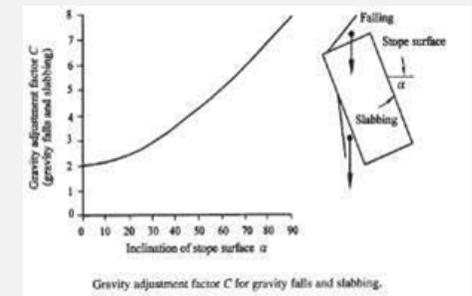
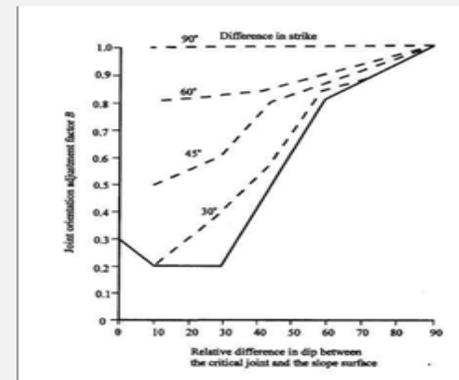
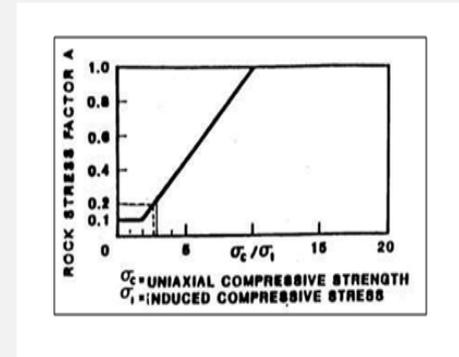
El diseño tiene que maximizar la recuperación de las reservas y minimizar la dilución.

Gráficos de estabilidad de caserón

El método del gráfico de estabilidad es un método empírico simple, el cual tiene como idea principal que el tamaño de una superficie pueda ser relacionado con la competencia del macizo rocoso para predecir su estabilidad (Mawdesley et al., 2001).



$$N = Q'' \times A \times B \times C$$

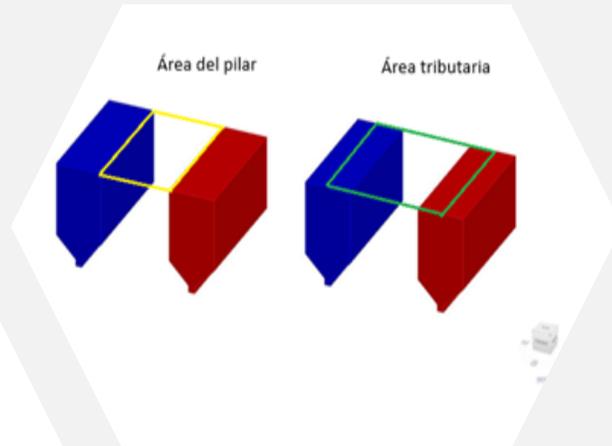


Gráficos de estabilidad de pilares

Para estimar la resistencia del pilar, se relacionan las dimensiones y parámetros geotécnicos de la roca donde se construye el pilar. Posterior a esto, se ajustan las fórmulas empíricas para el diseño de pilares en función a bases de datos. En la actualidad las fórmulas empíricas son las más utilizadas



Lunder en 1994 plantea que la resistencia de un pilar corresponde a la razón entre los esfuerzos principales σ_3/σ_1 (Lunder, 1994).

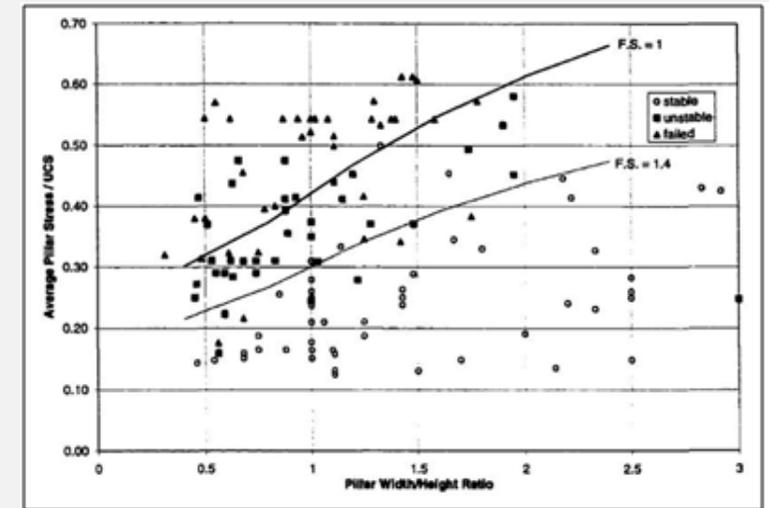


$$C_{pav} = 0.46 \times \left[\log \left(\frac{W}{H} + 0.75 \right) \right]^{\frac{1.4}{W/H}}$$

$$\kappa = \tan \left[\arccos \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

$$S_p = 0.44 \times UCS \times (0.68 + 0.52 \times \kappa)$$

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_p + W_o)(L_p)}{W_p L_p}$$



Gráficos de estabilidad de pilares

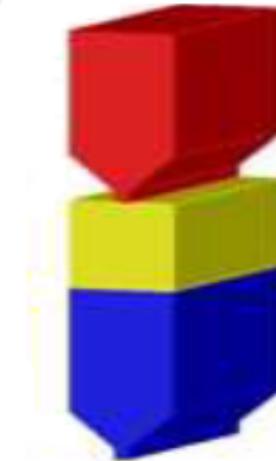
Método empírico para evaluar la estabilidad de crown pillar o placas, método Scaled Crown Pillar Span" (Cárter, 1992



$$C_s = S \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{t \cdot (1 + S_R) \cdot (1 - 0.4 \cos \theta)}}$$

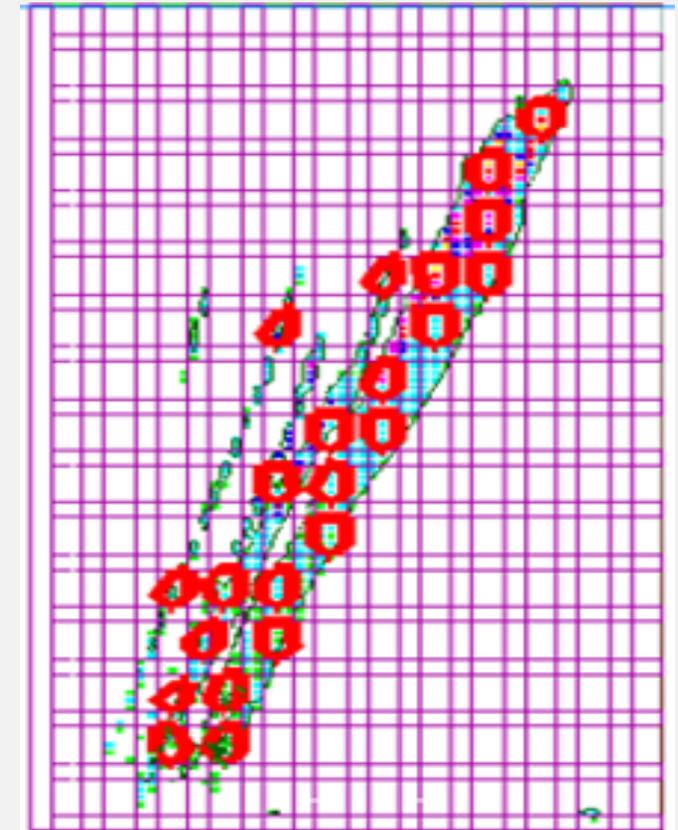
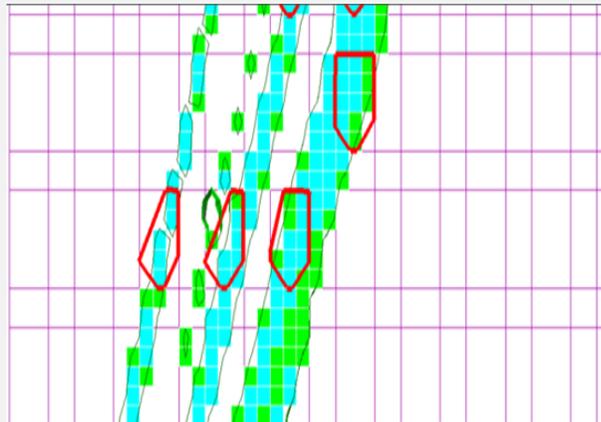
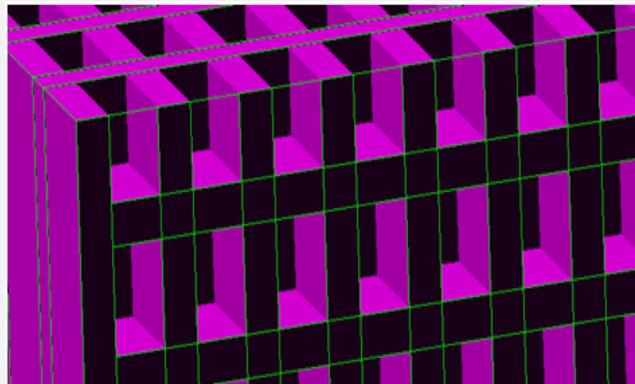
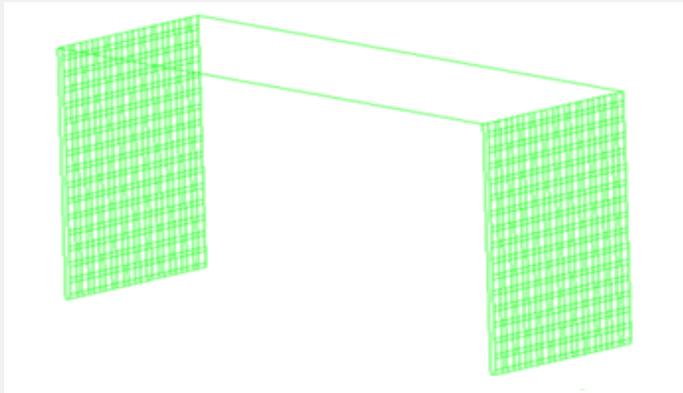
$$FS = \frac{S_c}{C_s}$$

$$S_c = 4.4 Q^{0.32}$$



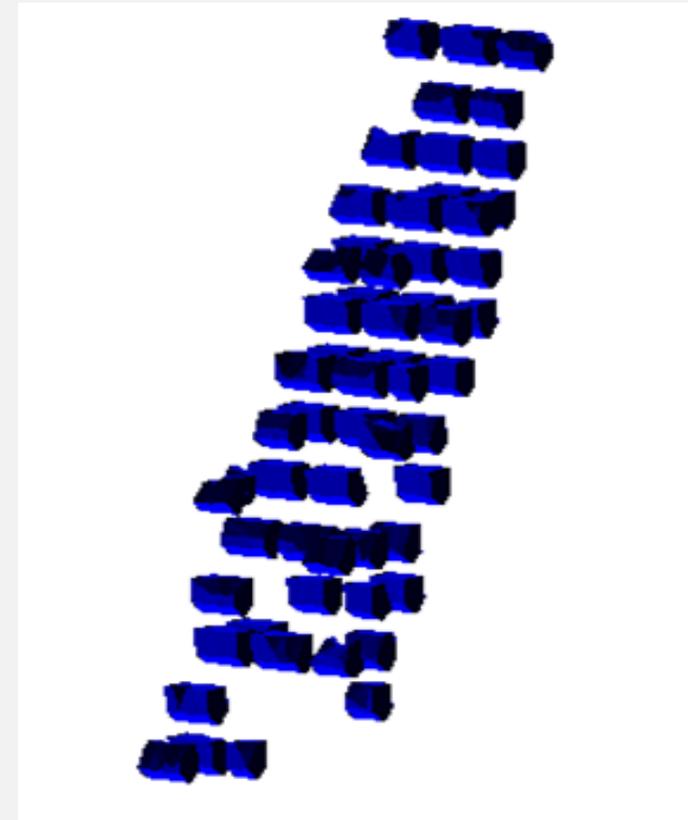
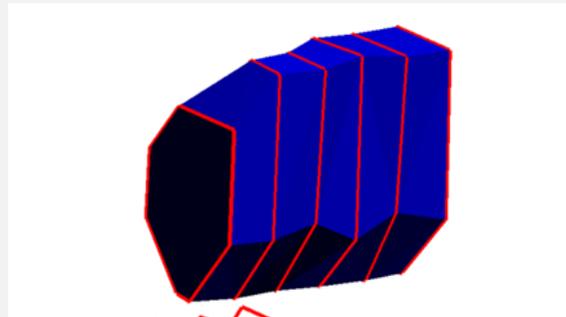
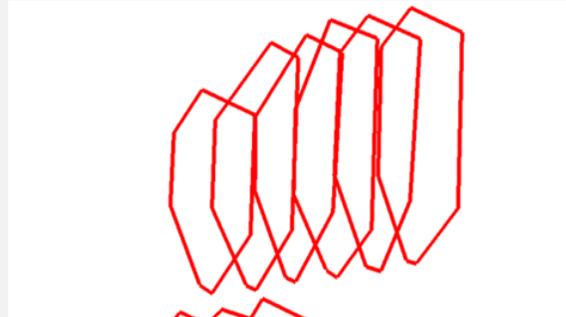
Método Manual del Diseño de Sub Level Stopping

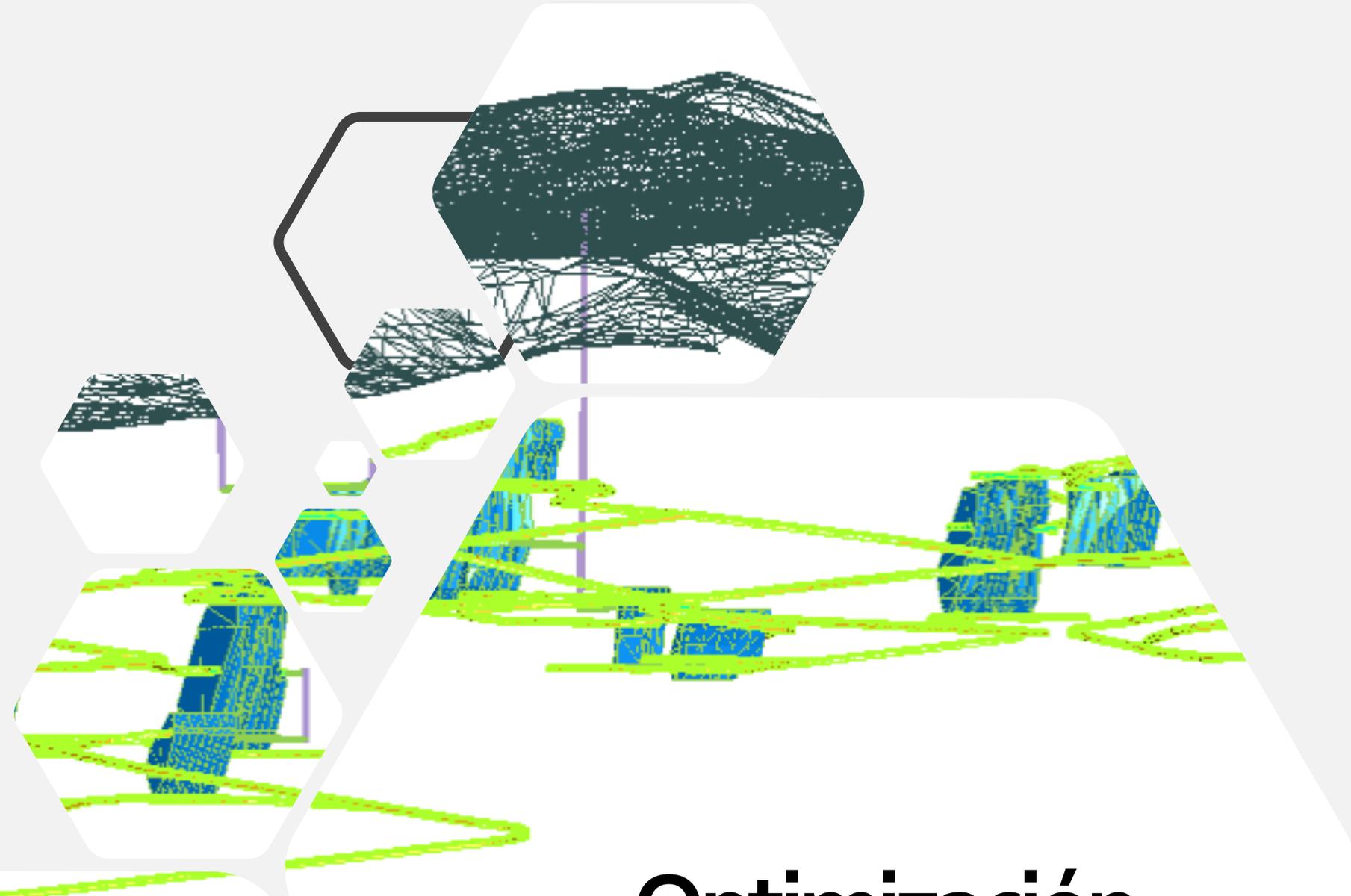
Actualmente, la ubicación de los caserones en el modelo de bloques, en la industria minera de operaciones de Sub Level Stopping, consiste en aplicar un patrón de pilares y caserones que respete las dimensiones máximas de los caserones y las dimensiones mínimas de los pilares, pero esta práctica no necesariamente es el mejor negocio (Sens, 2011).



Método Manual del Diseño de Sub Level Stopping

Por lo general, la ubicación de los pilares que se dejan entre los caserones se sitúa en ubicaciones inferiores a la ley de corte, pero no siempre es posible. La orientación de los caserones en la mayoría de los casos se orienta según la dirección de la mineralización.





Optimización

Optimización del Diseño de Sub Level Stopping

- En el año 1984 Deraisme en un modelo de 2 dimensiones superpone 2 secciones transparentes.
- Cheumanoff, en la cual en un volumen de mineral que está sobre la ley de corte lo discretiza en bloques y posteriormente selecciona qué bloques pueden ser parte de la unidad de explotación (Cheumanoff, 1989)
- En el año 1995 Christopher Alford investigador de la universidad de Queensland (Australia), propone el algoritmo “caserón flotante” el cual es implementado en el software comercial DATAMINE. Esta metodología se basa en un diseño en 2D
- En el año 2004 Ataee-Pour propone el algoritmo Maximum Neighborhood Value el cual consiste en evaluar un caserón que se va desplazando por el modelo de bloques, en el sector donde el conjunto de bloques que son parte del caserón genera un valor económico positivo.
- En el año 2014 Sandanayake presenta un método heurístico. La estrategia consiste en generar caserones de un tamaño fijo que presenten un beneficio económico positivo sin importar la presencia de pilares
- En el año 2016 María Grigaliunas plantea una modificación del algoritmo de Sandanayake con el fin de incorporar pilares



De las metodologías presentadas se considera una forma de caserón tipo paralelepípedo, rectángulo en 3 dimensiones, sin considerar la presencia de una zanja en la base del caserón, como ocurre en la industria en la aplicación del método Sub Level Stopping.

Modelo Propuesto

El modelo propuesto corresponde a una heurística que se ha programado en el lenguaje Python que permite obtener un layout que genere el máximo beneficio total respetando el tamaño máximo de los caserones y el tamaño mínimo de los pilares. El código tiene como input principal un modelo de bloques que contiene las coordenadas del centroide de los bloques y el beneficio asociado a cada bloque del modelo

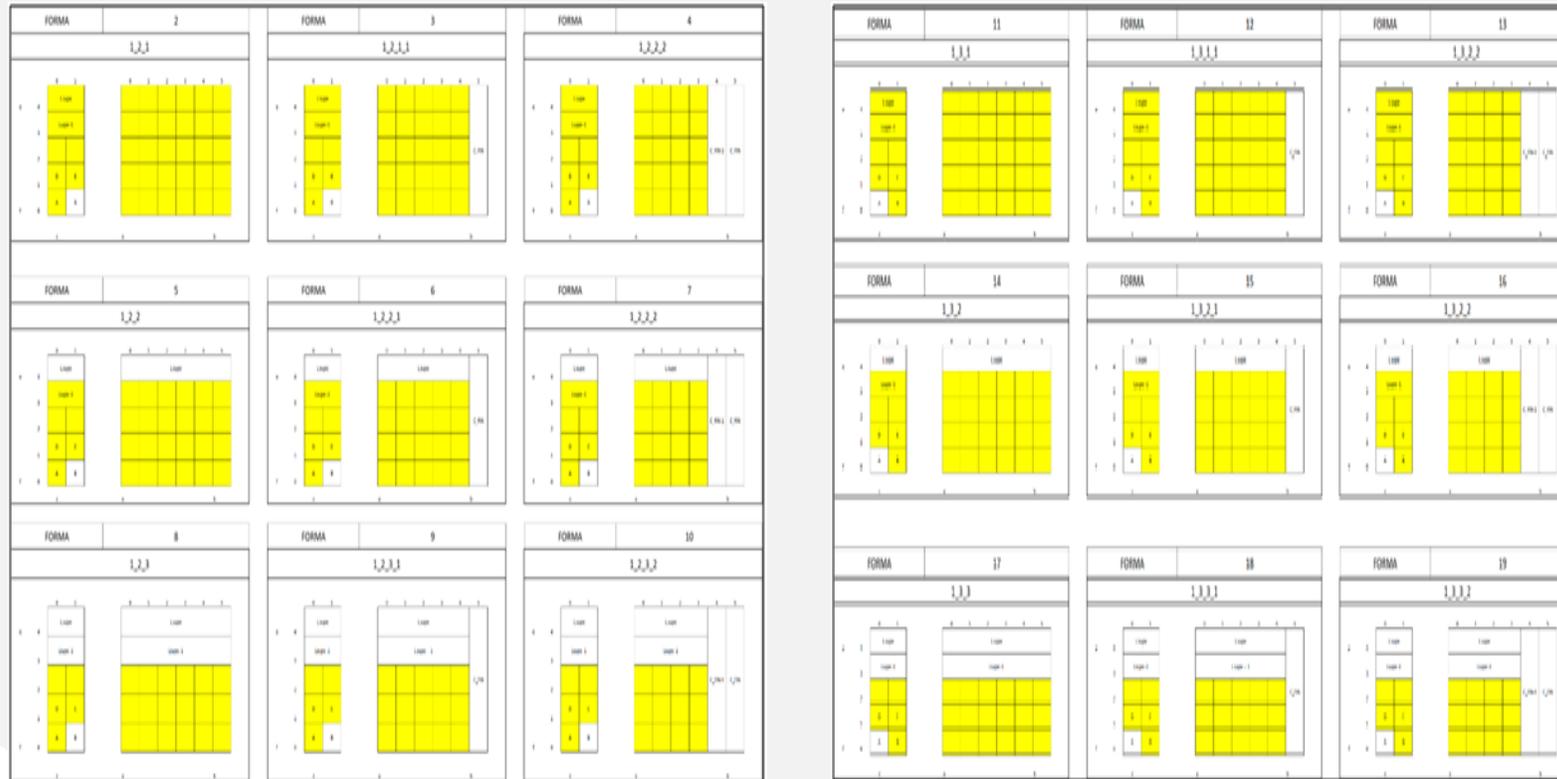


-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1



Modelo Propuesto

El modelo propuesto analiza diferentes formas de caserones, para anchos de 20, 30 y 40 metros.



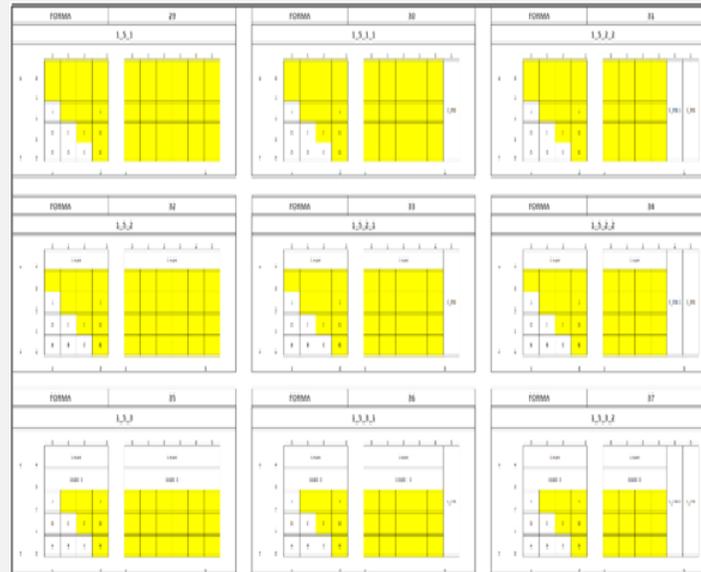
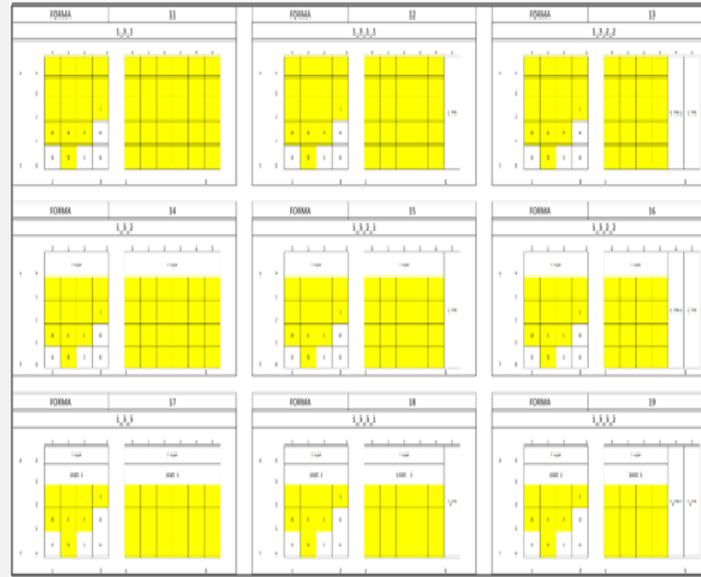
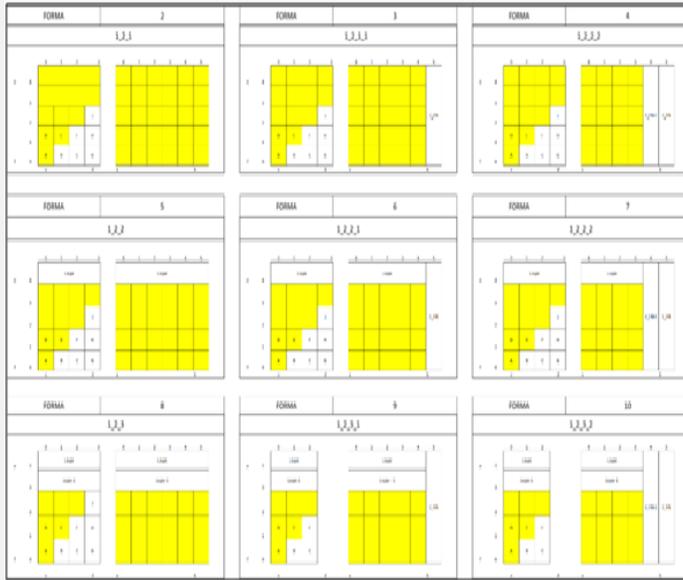


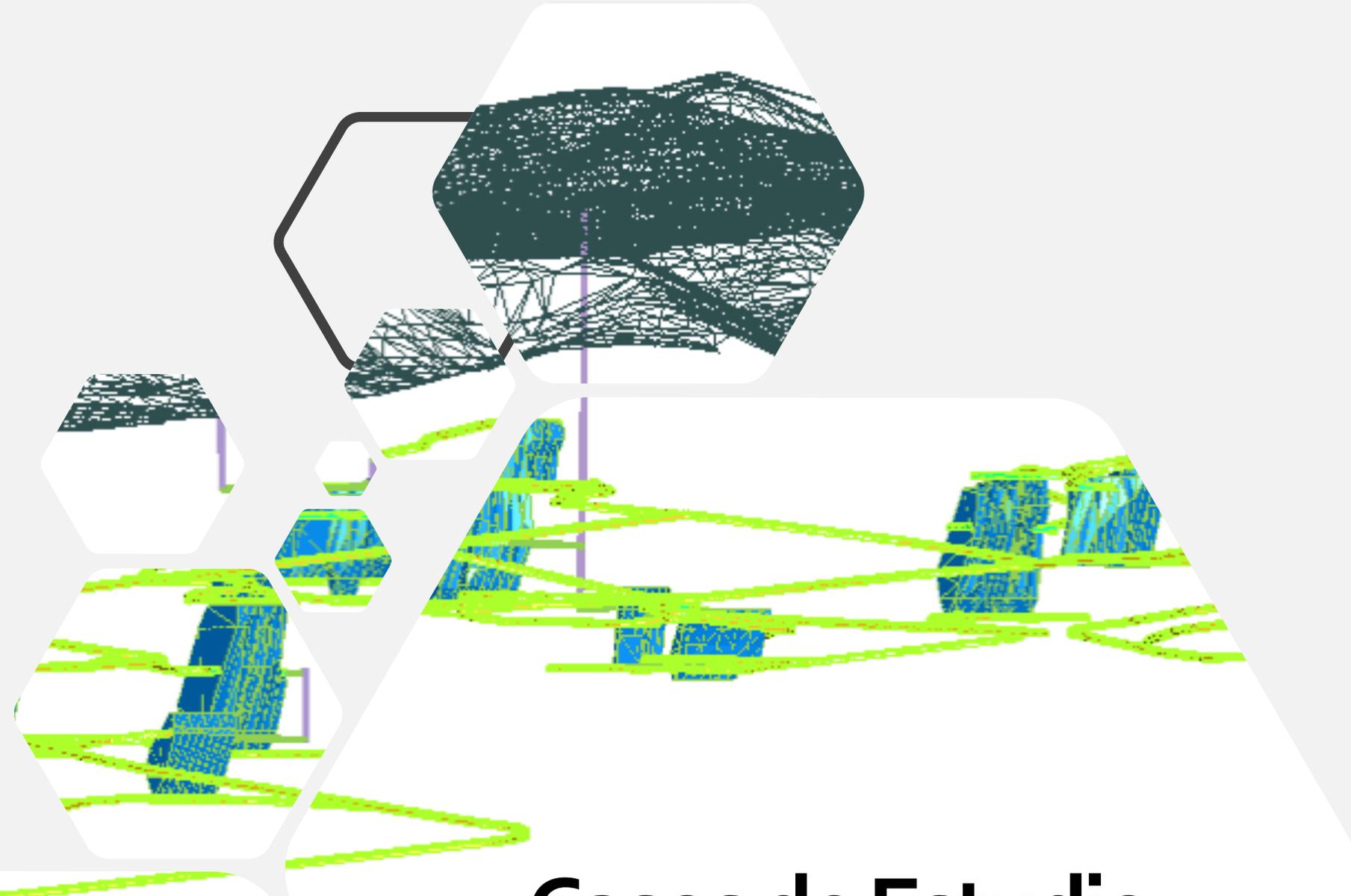
FORMA	2	FORMA	3	FORMA	4
1,2,1	1,2,1,1	1,2,2	1,2,1,1	1,2,2,1	
FORMA	5	FORMA	6	FORMA	7
1,2,2	1,2,2,1	1,2,2,2	1,2,2,1	1,2,2,2	
FORMA	8	FORMA	9	FORMA	10
1,2,2	1,2,2,1	1,2,2,2	1,2,2,1	1,2,2,2	

FORMA	11	FORMA	12	FORMA	13
1,3,1	1,3,1,1	1,3,2	1,3,1,1	1,3,2,1	
FORMA	14	FORMA	15	FORMA	16
1,3,2	1,3,2,1	1,3,2,2	1,3,2,1	1,3,2,2	
FORMA	17	FORMA	18	FORMA	19
1,3,3	1,3,3,1	1,3,3,2	1,3,3,1	1,3,3,2	

FORMA	20	FORMA	21	FORMA	22
1,4,1	1,4,1,1	1,4,2	1,4,1,1	1,4,2,1	
FORMA	23	FORMA	24	FORMA	25
1,4,2	1,4,2,1	1,4,2,2	1,4,2,1	1,4,2,2	
FORMA	26	FORMA	27	FORMA	28
1,4,3	1,4,3,1	1,4,3,2	1,4,3,1	1,4,3,2	







Casos de Estudio

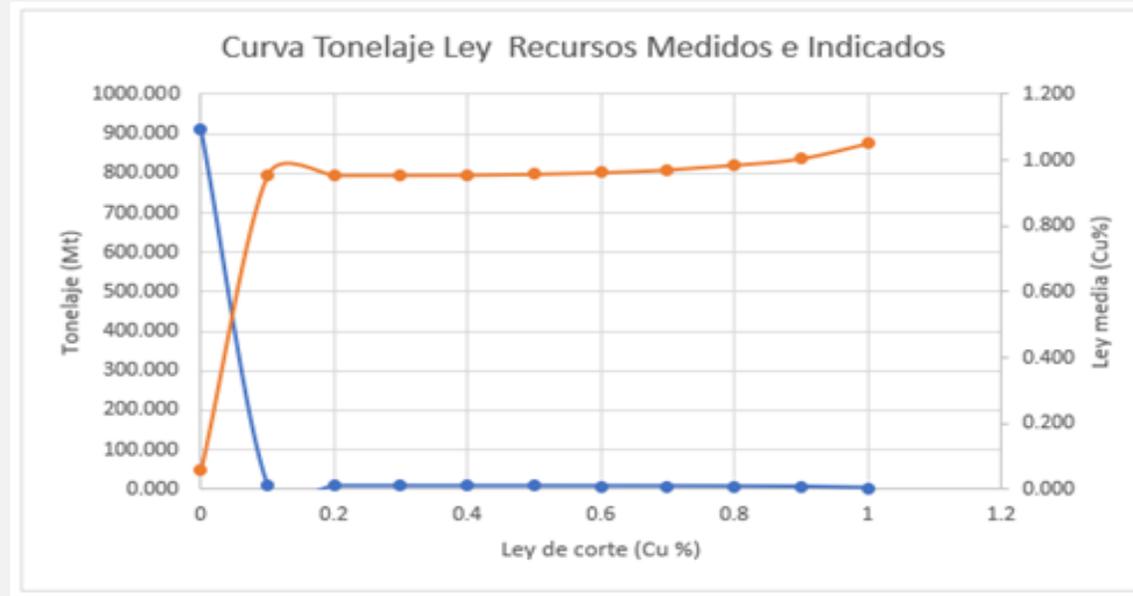
DESCRIPCIÓN CASO 1

El caso de estudio 1 corresponde a un modelo de bloques con un total de 337.280 bloques, las dimensiones de los bloques son de 10x10x10. Con los parámetros económicos se estima una Ley de corte económica de 0.4% cu. El tamaño máximo del caserón es de 60 de largo, 50m de alto y 40 metros de largo

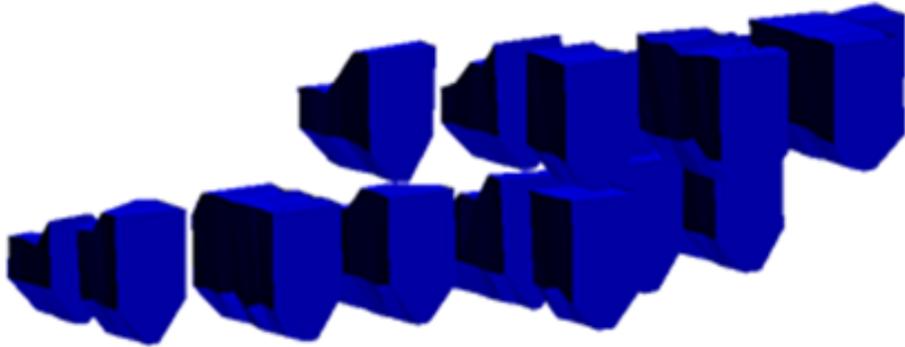


	Este(m)	Norte(m)	Cota(m)
mínimo	5860	3900	20
máximo	6480	4700	700

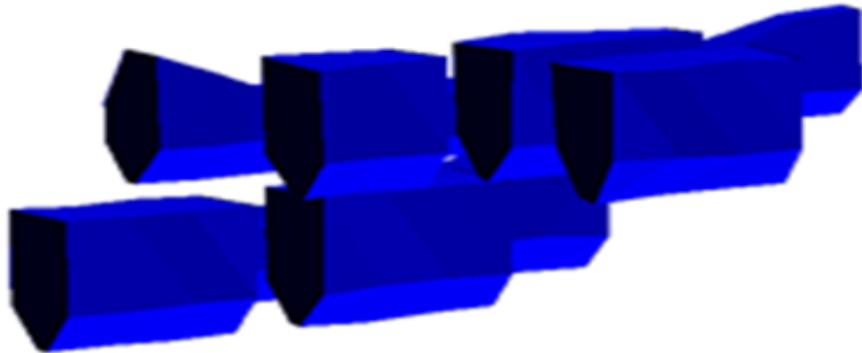
Precio Cu	3.00	US/lb
Costo Venta	0.1	US/lb
Costo mina	15	US/ton
Costo Planta	8	US/ton
Rec. Metalúrgica	90	%



RESULTADOS CASO 1



Diseño manual caso 1 plano XZ



Diseño manual caso 1 plano YZ

La reserva extraíble del diseño manual de la propuesta 1 es de 2,212 Mt con una ley media 0.74 % Cu, lo que corresponde a beneficio total de 42,32 MUS

La reserva extraíble del diseño manual de la propuesta 2 es de 1,59 Mt con una ley media 0.79 % Cu, lo que corresponde a un total de 35,59 MUS, representando una disminución del 18% del beneficio total

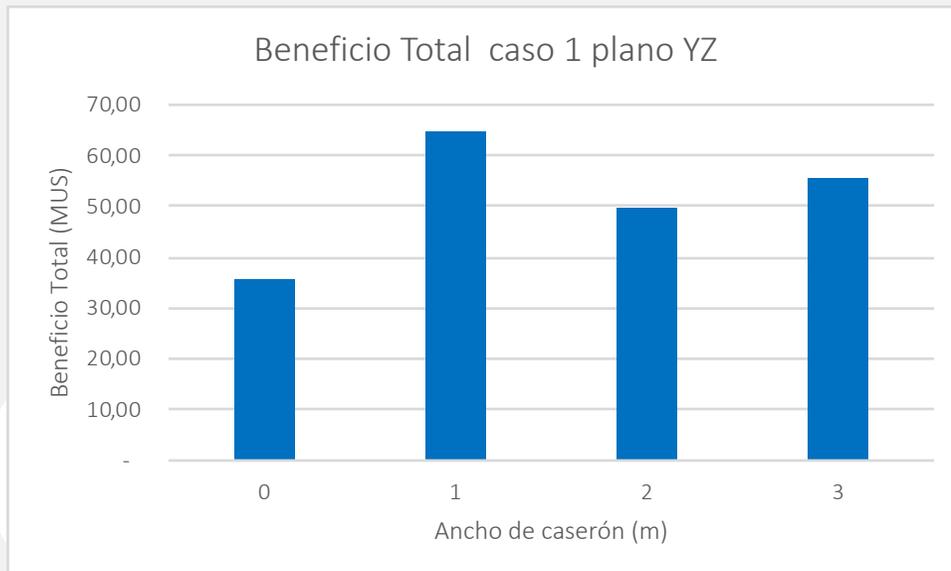


RESULTADOS CASO 1

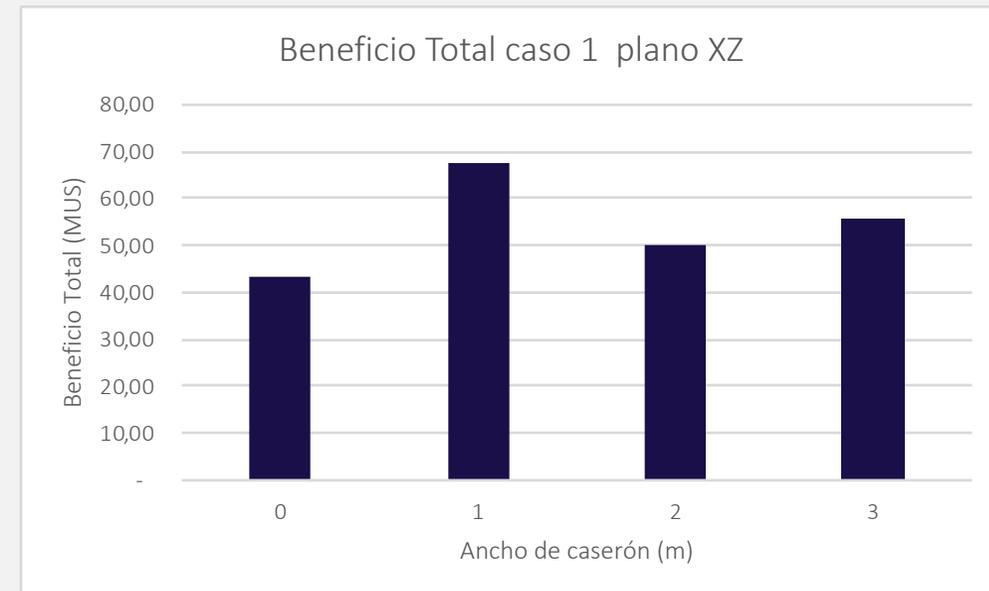
Las configuraciones de caserones y pilares evaluadas en el código de diseño



Configuración	1	2	3
ancho caserón (m)	20	30	40
alto caserón (m)	50	50	50
largo caserón (m)	60	60	60
crown pilar (m)	10	20	20
pilar longitudinal (m)	10	20	20
pilar transversal (m)	10	20	20



39.69%



19.94 %

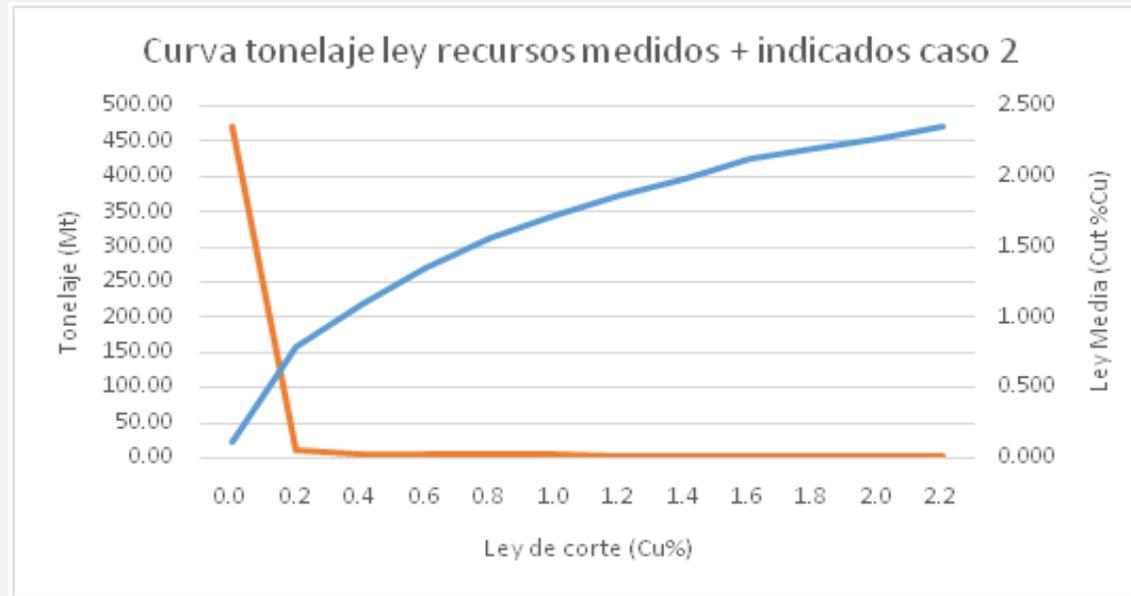
DESCRIPCIÓN CASO 2

El caso de estudio 2 corresponde a un modelo de bloques con un total de 168.750 bloques, las dimensiones de los bloques son de 10x10x10. Con los parámetros económicos se estima una Ley de corte económica de 0.4% cu. El tamaño máximo del caserón es de 60 de largo, 50m de alto y 40 metros de largo

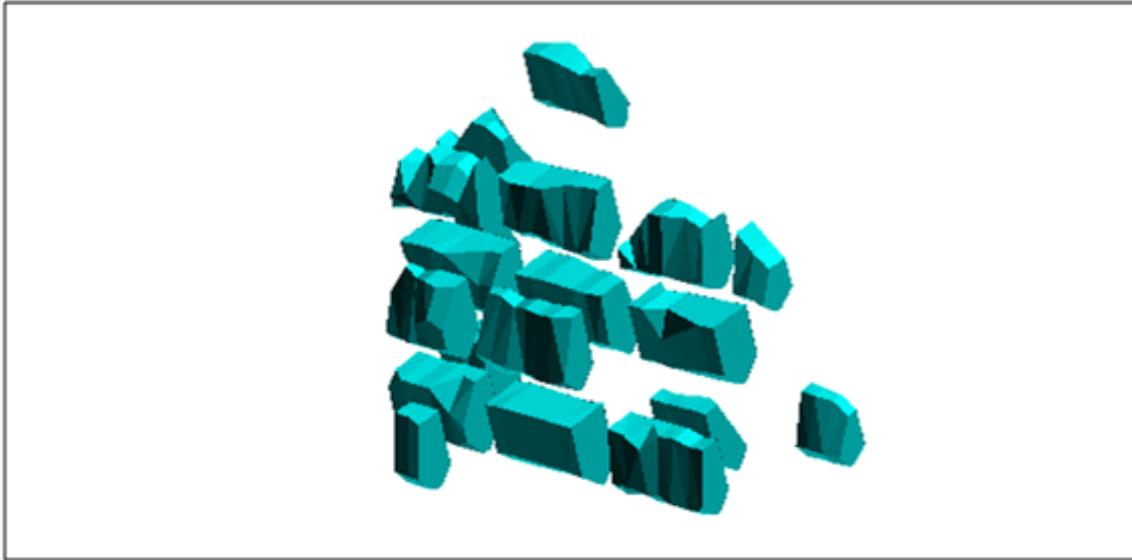


	Este(m)	Norte(m)	Cota(m)
Mínimo	386585	7118850	600
Máximo	387335	7119320	1100

Precio Cu	3.00	US/lb
Costo Venta	0.1	US/lb
Costo mina	15	US/ton
Costo Planta	8	US/ton
Rec. Metalúrgica	90	%



RESULTADOS CASO 2



Diseño manual caso 2 plano YZ

La reserva extraíble del diseño manual de la propuesta 2 es de 3,35 Mt con una ley media 0.96 % Cu, lo que corresponde a un total de 75.68 MUS

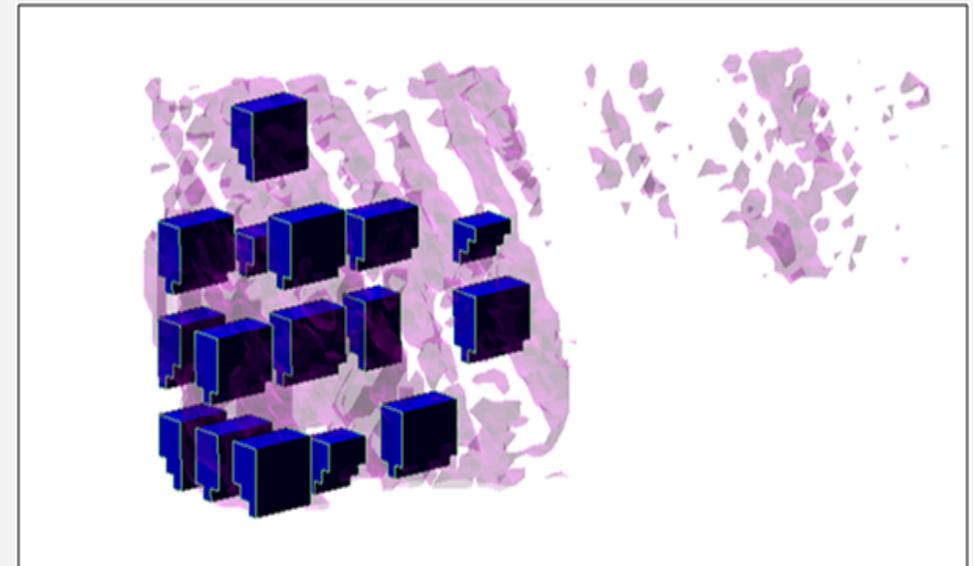
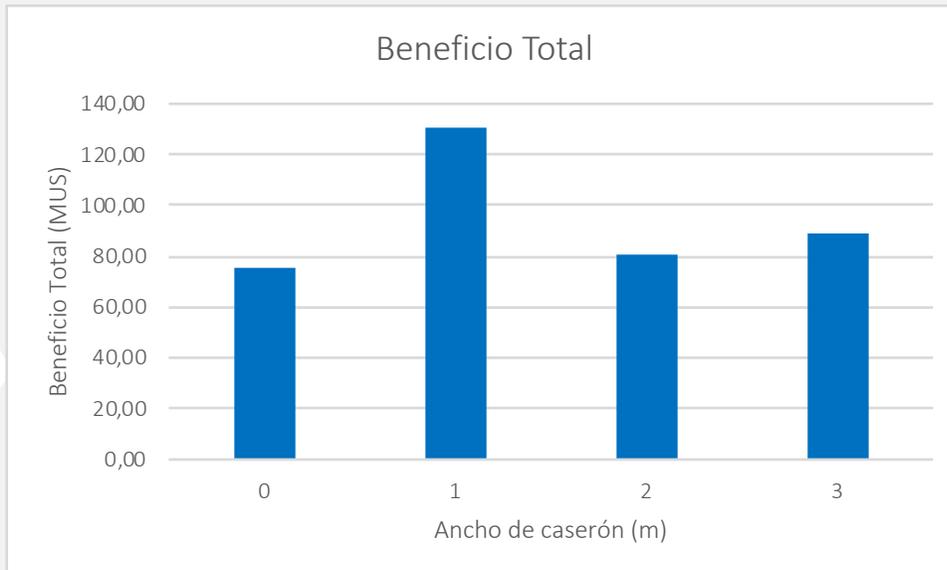


RESULTADOS CASO 2

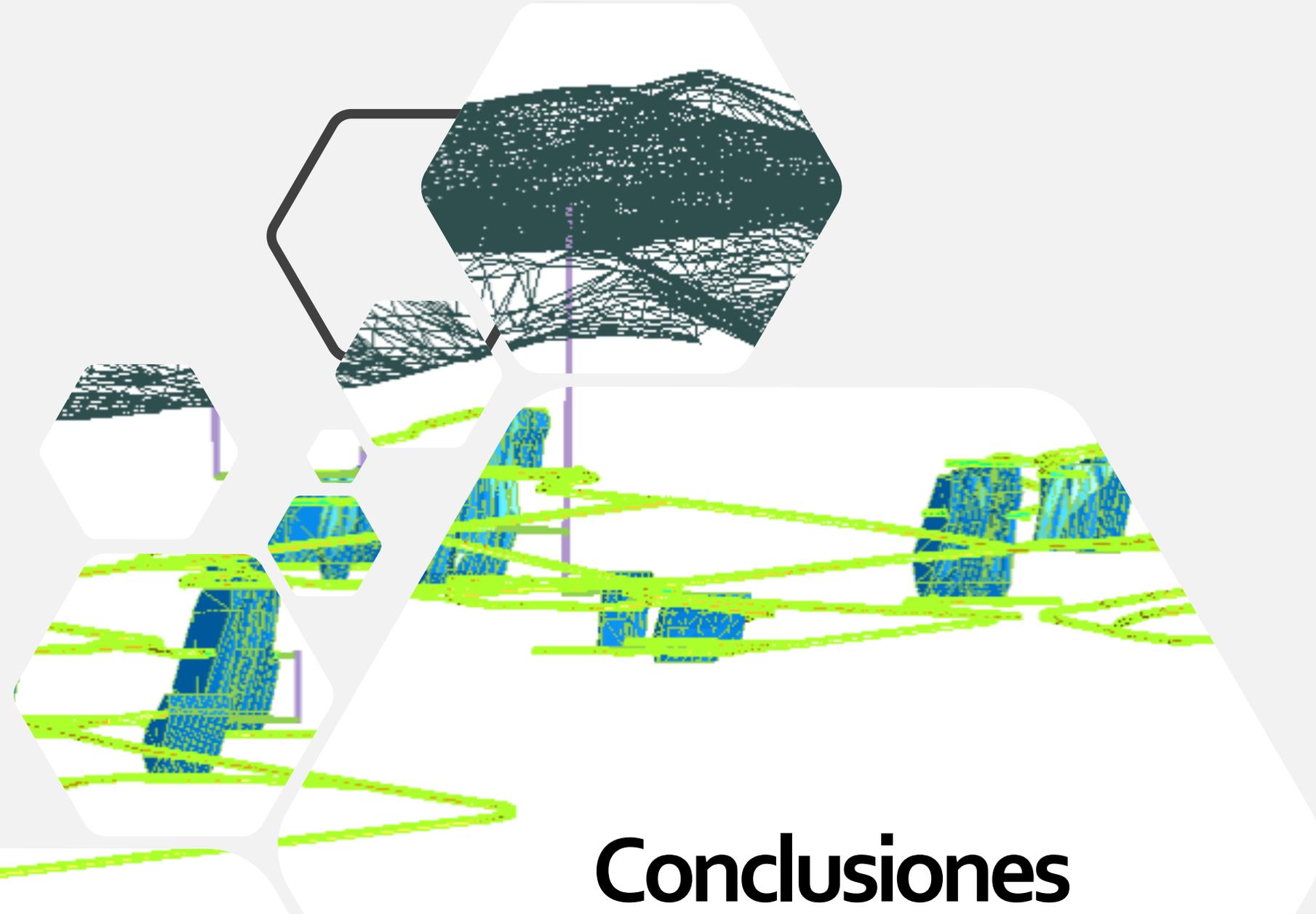
Las configuraciones de caserones y pilares evaluadas en el código de diseño



Configuración	1	2	3
ancho caserón (m)	20	30	40
alto caserón (m)	50	50	50
largo caserón (m)	60	60	60
crown pillar (m)	10	20	20
pilar longitudinal (m)	10	20	20
pilar transversal (m)	10	20	20



6.85%



Conclusiones

Conclusiones

El diseño de caserones y pilares es una etapa de la planificación que tiene un impacto directo sobre la rentabilidad de un proyecto minero subterráneo de Sub Level Stopping

El diseño minero es una labor compleja al tener que considerar parámetros económicos, geométricos, geomecánicos, restricciones de equipos, con el fin de lograr un diseño que maximice la recuperación de las reservas y minimice la dilución.

La metodología propuesta en el presente estudio presenta mejores resultados que el diseño manual generando un 20% (6-40) de incremento en el beneficio total del proyecto comparándolo respecto a un diseño manual para la misma configuración de pilares y caserones.

Trabajos Futuros

- Adaptar el código a tamaños de bloques de menor dimensión
- Incorporar el dimensionamiento por métodos empíricos
- Implementar la Representación gráfica del resultado en el código



Referencias

Clark, L. and Pakalnis, R.(1997). An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hanging walls and footwalls, in Proceedings CIM AGM, Calgary (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Westmount)

Grigaliunas, C.(2016). Universidad de Chile, Tesis para optar al grado de magister en minería memoria para optar el título de ingeniera civil de minas.

Hartman, H.(2002). Introductory Mining Engineering, Editor John Wiley & Sons, 1 edición.

Lunder, P. J. (1994). Hard rock pillar strength estimation an applied empirical approach, British Columbia, Thesis for Master of Applied Science.

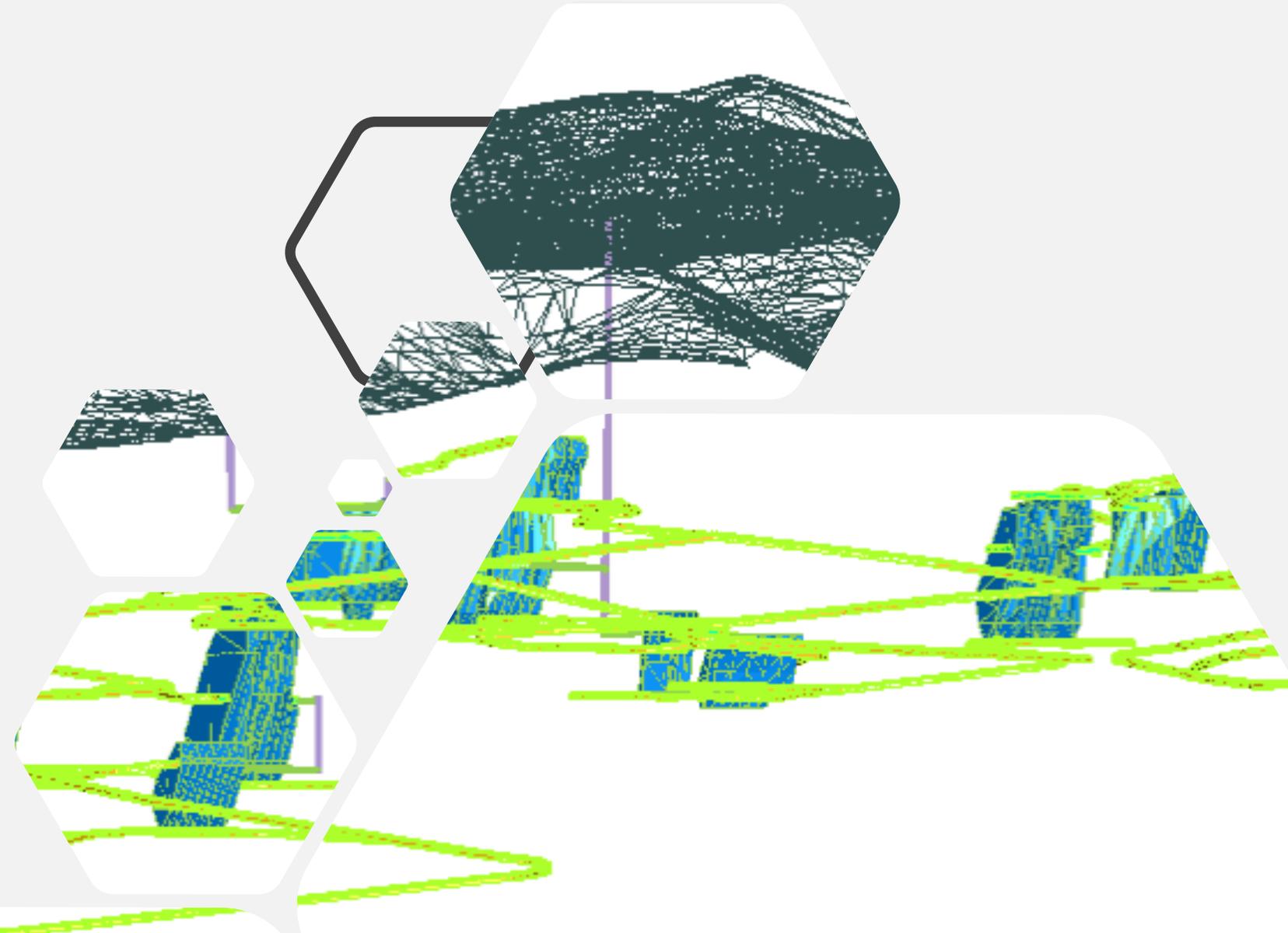
Mathews K. E., Hoek, E., Wylie, D.C. and Stewart, S.B.V. (1980).Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000 m in hard rock. Report to Canada Centre for Mining and Energy Technology (CANMET), Department of Energy and Resources.

Mawdesley, C., Trueman, R. and W.J. Whithen. "Extending the Mathews stability graph for open-stope design." Trans. Institution of Mining and Metallurgy, A27-A39, 2001.

Sandanayake, D. (2014). Stope boundary optimisation in underground mining based on a heuristic approach.Australia: PhD Thesis, Western Australian School of Mines.

Sens, J. (2011). Stope mine design optimisation using various algorithms for the randgold kibali
Villaescusa, E.(2000). A review of sublevel stoping, MassMin2000, Chitombo G (ed), The AusIMM: Melbourne.





**Gracias por su
atención**