

REPORTE PROYECTO DOPPLER 2021

Esteban Castillo - Matias Escudero - Felipe Labra - Angello Rivera - Catalina Salgado

Descripción

El siguiente reporte se basa en el análisis de un yacimiento de cobre representado por un modelo de bloques. La finalidad del estudio es contrastar los resultados que se obtienen al realizar un método de agendamiento tradicional (Pits Anidados) y el agendamiento directo de bloques, tales procesos serán ejecutados a través del software “Delphos Open Pit Planner” (Doppler).

1. ANÁLISIS BÁSICO

- Estadísticas básicas

Tabla 1: Estadísticos descriptivos

Atributo	Min.	Máx.	Promedio	Varianza	Nro. Bloques
%Cu	0.001	1.219	0.535	0.101	6079
%Cu óxidos	0.014	0.317	0.065	0.004	148
%Cu sulfuros	0.001	1.219	0.547	0.098	5931

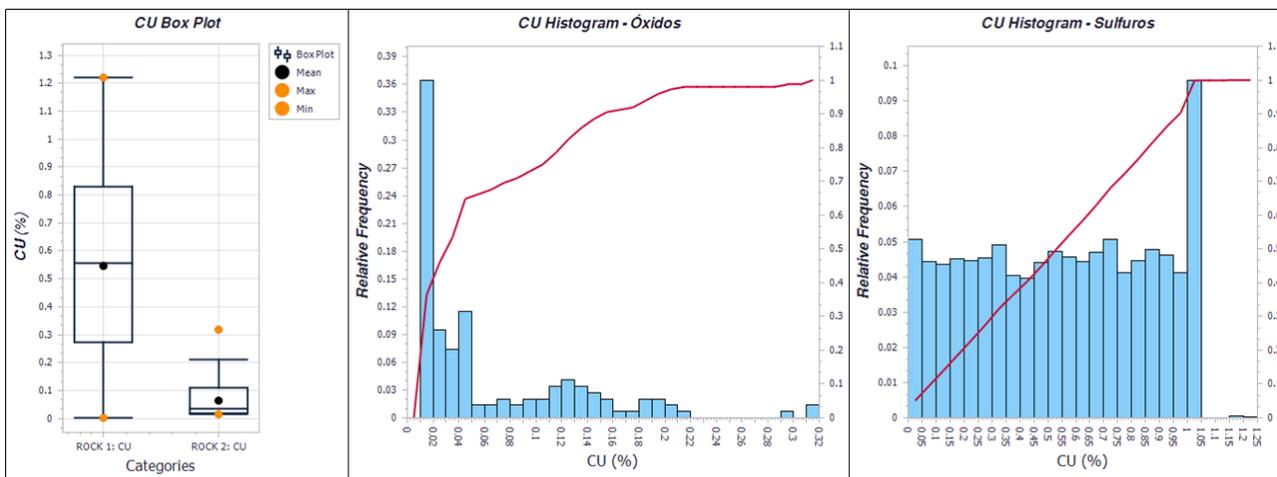


Figura 1: Box Plot e Histogramas del Cobre en óxidos y sulfuros

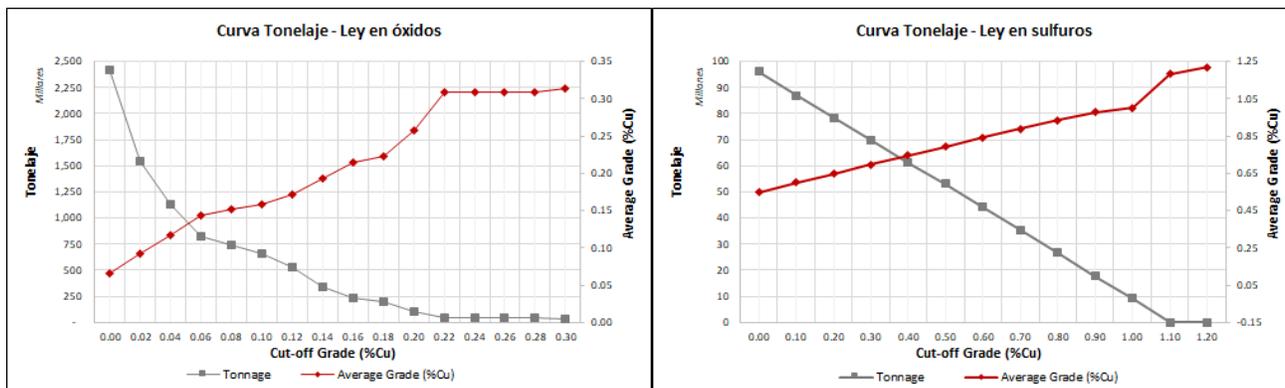


Figura 2: Curva Tonalaje - Ley del Cu en óxidos y sulfuros / Cálculo de Pit final y Pits anidados

2. CÁLCULO DE PIT FINAL Y PITS ANIDADOS

Para el cálculo de Pit final se han considerado los siguientes parámetros:

Tabla 2: Parámetros económicos

Parámetro	Valor
Precio (Cu) [US\$/lb]	2.8
Costo Mina [US/ton]	2
Costo Planta Sulfuros [US/ton]	7.2
Costo Planta óxidos [US/ton]	5.1
Costo Venta	0.15
Recuperación óxidos	60%
Recuperación Sulfuros	80%

Tabla 3: Parámetros geométricos

Rocktype	Ángulo global
0	42°
1	45°
2	48°

El pit final se logró una vez ingresado los ángulos de precedencia (Tabla 3) y el parámetro del modelo de bloques que nos dio el valor por cada bloque (valor planta). En la figura 3 y 4 podemos observar el pit final obtenido.

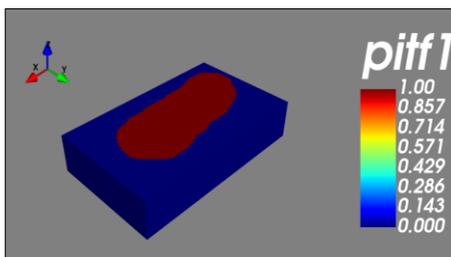


Figura 3: Pit final vista isométrica

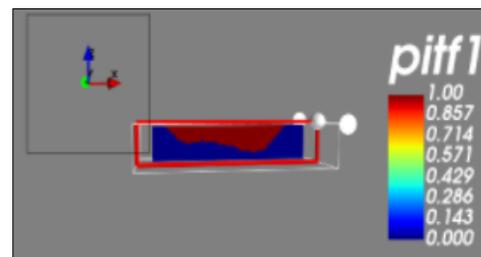


Figura 4: Pit final vista slice XZ

Tabla 4: Resultados Pit Final (Valor y N° Bloques)

Pit Value	1,225,962,240
Number of Blocks	17,323

- **Pits anidados**

En el caso de los pits anidados se utilizaron los mismos parámetros económicos para la valorización de pit final (Tabla 3), pero considerando una familia de ponderadores sobre el precio (revenue factors) desde 0.00 hasta 1.00 utilizando un paso de 0.02. Finalmente, se obtiene la gráfica del pit by pit (Figura 6) donde se grafica el valor y el destino del material (mineral = amarillo, desmonte = gris) de cada pit anidado. A partir del RF = 0.42 se forman los pits anidados.

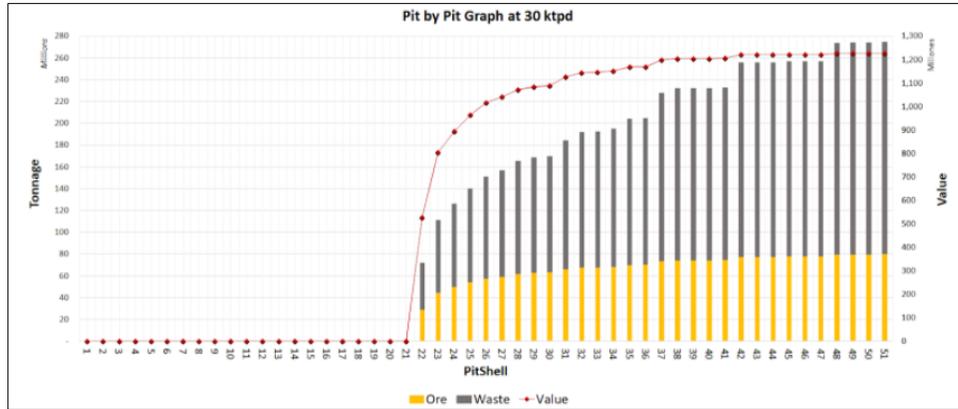


Figura 5: Gráfica Pit by Pit

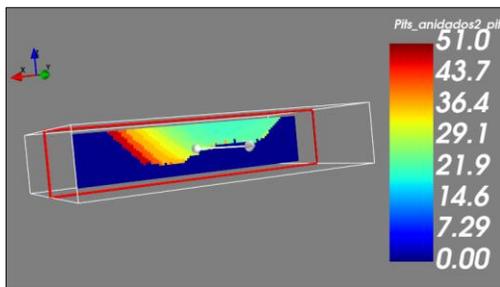


Figura 6: Pit Anidado vista slice XZ

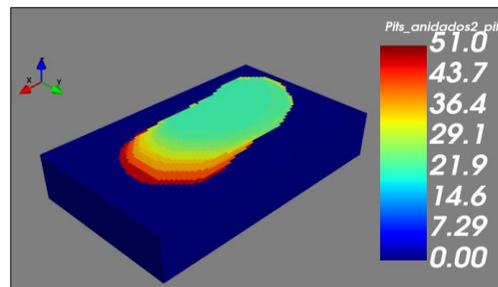


Figura 7: Pit final vista isométrica

3. Selección de fases

La selección de fases se hizo bajo el criterio de garantizar el espacio operacional y según el valor y tonelaje por pit. Evaluando el valor y tonelaje de cada pit, se escogió el pit 40 con Revenue Factor (RF) de 0.8 con un tonelaje correspondiente de 232,624,860 como último pit, ya que a partir de este el valor económico se estabiliza, pero sigue aumentando la extracción de estéril para los demás pits, según la figura 6. Dividiendo este tonelaje en tres fases se obtiene que la primera fase va del pit 1 al pit 22, la segunda fase del pit 22 al pit 27 y la última fase va del pit 27 al 41. En la figura 8 se observa que se garantiza el espacio operacional de los equipos.

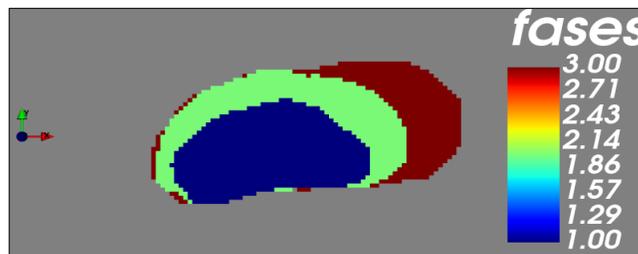


Figura 8: Fases de explotación del proyecto.

4. Agendamientos

Se realizó el agendamiento manual convencional por fases y el agendamiento directo de bloques de acuerdo a los parámetros de la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros de los Agendamientos convencional por fases y directo por fases

	Agendamiento Convencional por Fases	Agendamiento Directo por Bloques (DBS)
Destinos	-	Planta y Botadero
Capacidad Mina [tpa]	18,000,000	18,000,000
Capacidad Planta [tpa]	10,800,000	10,800,000
Min/Max Lead	2/3	-
RF	0.42 ; 0.52 ; 0.80	-
Tasa de descuento	0.1	0.1
MIP Gap	-	0.05
Total periodos [años]	11	13

Los trece años u horizontes del agendamiento por bloques es el resultado de dividir el tonelaje del último pit considerado en nuestra selección de fases y de pits anidados por la capacidad de minado anual.

5. Comparación entre agendamientos

Realizando una comparación entre los métodos de agendamiento, se puede ver el VPN que arrojaron en el software cada uno de ellos. En la figura N°10 se observa una maximización del VPN para el agendamiento directo de bloques, es mucho mayor en comparación con el tradicional (figura N°9), porque este método optimiza la creación de pits, define un mejor destino del bloque dependiendo su valor y su programación de la extracción, es por ello que se observa una gráfica más estable en comparación a la producción del tradicional.

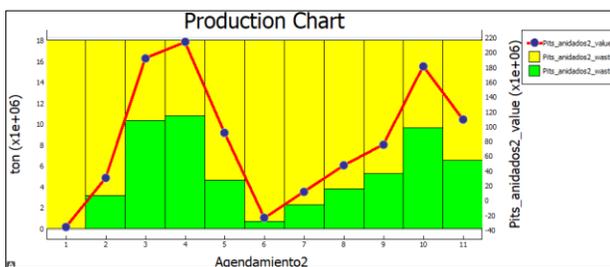


Figura 9: Gráfico de Agendamiento Tradicional

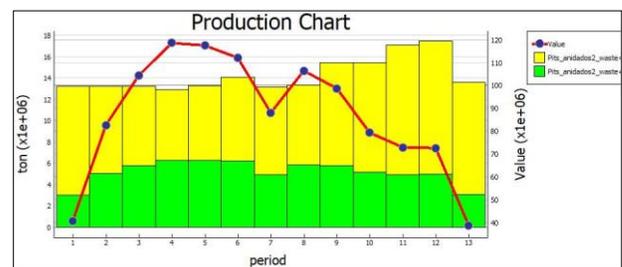


Figura 10: Gráfico de Agendamiento Directo de Bloques (DBS)

Tabla 6: VPN de Agendamiento Tradicional y DBS

Agendamiento	Tradicional	DBS
VPN	494,090,773	627,830,113
Undiscounted Value	892,742,542	1,132,045,310

6. Análisis Complementario

- **Impacto de los resultados de agendamientos: Análisis de las capacidades**

Como se pudo observar en la comparación de agendamientos, el resultado entregado por DBS tiene una mejor distribución de la extracción de mineral en comparación al agendamento convencional, lo cual es una situación bastante más cómoda para el futuro cálculo de equipos requeridos en operación y diseño minero, ya que no se producen variaciones drásticas entre periodos evitando generar capacidades ociosas de los equipos, es decir, no se tendrá una cantidad excesiva de maquinarias en un periodo que la alimentación de mineral será, por ejemplo, un 40% menor a la de un periodo anterior. Sin embargo, vale remarcar que el agendamento DBS nunca alcanzó la capacidad planta máxima ingresada, por lo cual se podría cuestionar si la capacidad planta sugerida como input para este modelo es la más adecuada y ver la posibilidad de reajustar este parámetro al disminuirlo hasta 6,000,000 de toneladas aproximadamente.

Respecto a la capacidad mina, la situación es la contraria ya que en este caso el agendamento que mejor se acopla al input otorgado es el convencional, por lo que la capacidad ociosa en este caso ocurriría en DBS. En base a estos resultados se concluye que posterior al resultado entregado por el software Doppler, será necesario generar un “suavizamiento” del plan que sea seleccionado para evitar futuros problemas en las siguientes etapas.

- **Variación Min/Max Lead**

Variando el Min/Max Lead para el agendamento manual por fases sin modificar los otros parámetros (tabla 5), se obtuvieron los siguientes resultados, Tabla 7.

Tabla 7: Resultado de la variación del min/max Lead

Agendamento	Min/Max Lead	VPN [USD]	Minado [ton]	Mineral [ton]
Manual1	0/0	\$584,063,666	156866816.9	59275860.49
Manual2	1/2	\$483,695,828	197243682	56985678.96
Manual3	2/3	\$494,090,773	197999994.7	57021225.45
Manual4	3/4	\$514,499,725	194408325.8	58591677.41

Es de notar que cuanto mayor es la diferencia en bancos entre fase, existe la posibilidad de profundizar y extraer más del yacimiento mineral, pero esto afecta directamente la seguridad de la operación.

Las figuras Anexos 8 a Anexos 11, demuestran que al aumentar min/max lead la extracción del mineral se profundiza y el desarrollo de la fase 3 se da hacia los laterales del pit, así mismo, en la figura Anexos 12 se evidencia que ocurre una mayor extracción del mineral con min/max lead de 3/4 y al disminuir la cantidad de bancos desde donde empieza la transición de una fase a otra, la cantidad de mineral también aumenta y disminuye la extracción de estéril.

En el caso de min/max lead 0/0, se evidencia que no se desarrolla la fase 3 del proyecto, ya que no existe diferencias de bancos entre una fase y otra y no hay una cantidad mínima de bancos de desfase, lo cual se limitaría a la extracción de los económicamente rentable dejando por fuera parámetros de seguridad y estabilidad.

- **Variación del costo de minado según la profundidad del yacimiento.**

Se determinó una función lineal del tipo $y = ax + b$, donde y es el costo de minado y x la profundidad. El costo de minado máximo se tomó del costo minado promedio de la mina Quebrada Blanca Fase 2 según el reporte técnico

NI 43-101 año 2019 de la empresa Teck Resources Limited, el cual es 3.37 \$USD/ton [Ref 1]. Otras simulaciones sugieren costos de 1 \$USD/ton [Ref 2 y 3]. Como costo de minado superficial se estableció 2 \$USD/ton según las instrucciones del proyecto. La ecuación para el costo de minado es la siguiente:

$$\text{Costo_minado} = -0.004[Z] + 3.0722.$$

Ecuación 1: Costo minado en función de la profundidad.

La tabla 8 resalta la variación del VPN con el costo de minado para cada tipo de agendamiento, donde AGM y AGA son los agendamientos manuales y automáticos por fase y DBS el agendamiento directo por bloques. La expresión _cm indica el agendamiento al cual se le aplicó la función Costo__minado.

Tabla 8: Variación del VPN con el agendamiento y el costo de minado.

Agendamiento	VPN [USD]	Estéril [ton]	Descapote
DBS_cm	\$605,136,809	117866300	1.75
AGM_cm	\$480,987,542	139759902	2.40
AGA_cm	\$428,062,704	140332305	2.67
DBS	\$627,830,113	117810520	1.75
AGM	\$494,090,773	140578769	2.45
AGA	\$464,190,468	157704731	2.71

En conclusión, al aumentar el costo de minado con la profundidad, disminuye el valor económico de cada bloque y el número de estos. Aunque estos bloques presentan mayor ley, conlleva una mayor extracción de estéril para extraer el mineral, lo cual disminuye el VPN para cada agendamiento.

- **Variación del precio en cálculo de Pit final**

Se ha desarrollado un análisis de sensibilidad del valor del pit final frente a variaciones del precio del cobre, ya que el mercado es un punto de incertidumbre poco controlable y puede afectar bastante en la definición de rentabilidad de un proyecto. Para esto se han considerado tres variaciones porcentuales: ±5%, ±15% y ±20%, obteniendo lo siguiente:

Tabla 9: Resultado análisis de sensibilidad variación del precio

PIT FINAL				
%Variación	Precio (USD/lb)	Pit Value	N° Bloques	%Variación Pit Value
20%	3.36	1,726,417,567	18144	41%
15%	3.22	1,600,189,244	17637	31%
5%	2.94	1,350,265,169	17361	10%
Precio actual	2.8	1,225,962,240	17323	0%
-5%	2.66	1,102,058,743	17263	-10%
-15%	2.38	859,648,306	16147	-30%
-20%	2.24	741,470,587	14669	-40%

Como se puede observar en la tabla, una variación en el precio representa el doble de variación en el valor del Pit, ya sea a favor o no. Respecto a la variación en la cantidad de bloques a extraer, cuando cambia el precio en un -20% se observa una mayor variación en el número de bloques en comparación a la cantidad de bloques extraídos cuando se aumenta el precio en un 20%, siendo un aspecto importante en relación a la cantidad de material por mover que será una variable en la etapa de diseño futuro.

En conclusión, el efecto de la volatilidad del precio de los commodities se puede observar desde etapas tempranas de la planificación y que si bien este es un valor bruto, que no incorpora otros elementos de una evaluación económica completa, es útil como una mirada preliminar de qué tan sensible al precio es este modelo.

● **Análisis de algoritmos de agendamiento DBS**

Con la finalidad de observar las diferencias entre el funcionamiento de los algoritmos de resolución para el agendamiento DBS se han generado los planes mediante Sliding Window y Relaxed Sliding Window, los cuales han sido comparados con el método Toposort que fue el utilizado el análisis básico. A continuación, se presentan los 3 resultados:

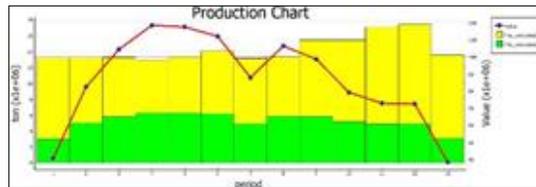


Figura 11: Plan mediante método Toposort

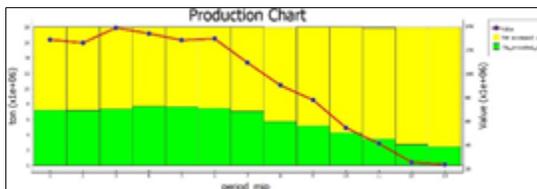


Figura 12: Plan mediante método Sliding Window

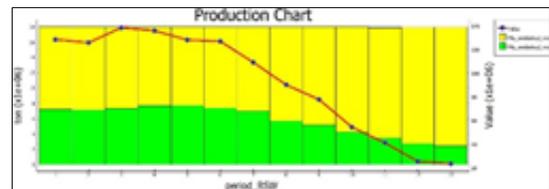


Figura 13: Plan mediante método Relaxed Sliding Window

Como se puede observar, ambos métodos de resolución, Sliding Window y Relaxed Sliding Window, consiguen ser más equilibrados y tener una mejor distribución de mineral y material movido en base a la capacidad planta y capacidad mina, siendo esta última un déficit para el método Toposort que no distribuye equitativamente el movimiento de material durante los últimos periodos. Respecto al VPN de los agendamientos, las curvas de valor de los dos últimos métodos tienen una tendencia más uniforme, obteniendo 750,641,323.73 para el método Sliding Window y 750,909,724.77 en el método Relaxed Sliding Window, superando en ambos casos al método Toposort que obtuvo un VPN equivalente a 627,830,113.

Finalmente, los resultados de la comparación se alinean a los esperados, ya que los métodos Sliding y Relaxed Sliding Window analizan el problema en base a cada periodo, generando un resultado enfocado en un sistema más pequeño por lo cual se consigue una mejor distribución durante cada año. Por otro lado, Toposort analiza el problema de una forma global, incorporando todo el sistema y no es un método tan focalizado como los anteriores. Lo anterior se puede observar en las visualizaciones de los 3 modelos que se encuentran en los anexos de este documento y donde se ve claramente la diferencia en el avance de cada método periodo a periodo, siendo Toposort el que abarca un mayor volumen durante las primeras etapas.

ANEXOS

- **Características del Modelo**

El modelo que se tiene a disposición posee una serie de características básicas, las cuales se presentan a continuación:

Tabla Anexos 1: Características del Modelo de Bloques

Nro. de Bloques	116,640
Dimensiones del Modelo (m)	1780 x 1060 x 345
Dimensiones del Bloque (m)	20 x 20 x 15
Variables	Tonelaje - Ley de Cobre (%) - Tipo de Roca (Estéril, Óxidos, Sulfuros)

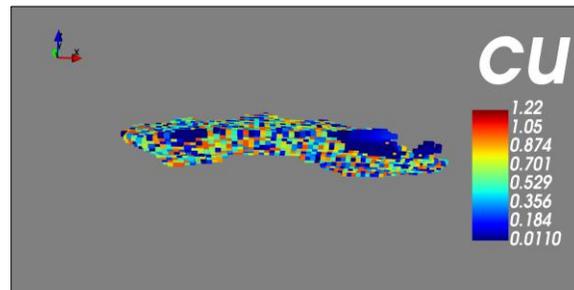


Figura Anexos 1: Cuerpo Mineralizado

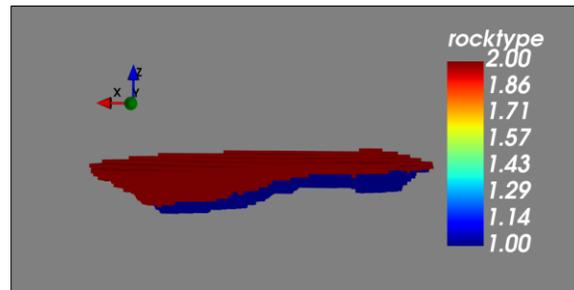


Figura Anexos 2: Modelo caracterizado por tipo de roca (azul= sulfuros, rojo= óxidos)

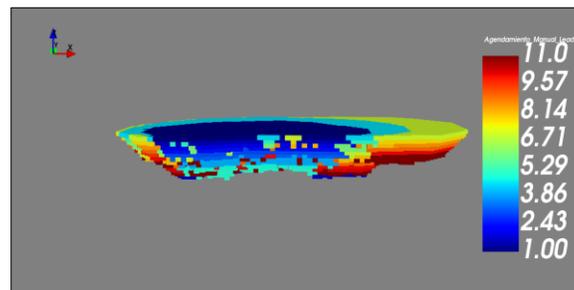


Figura Anexos 3: Agendamiento a través de selección manual de Pushbacks

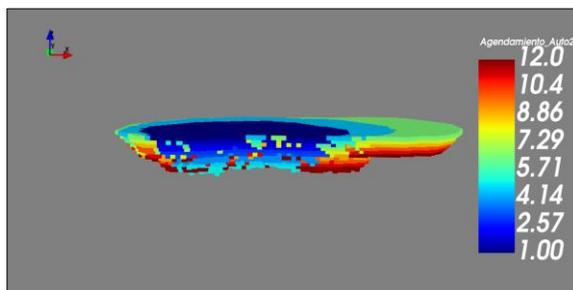


Figura Anexos 4: Agendamiento a través de selección automática de Pushbacks

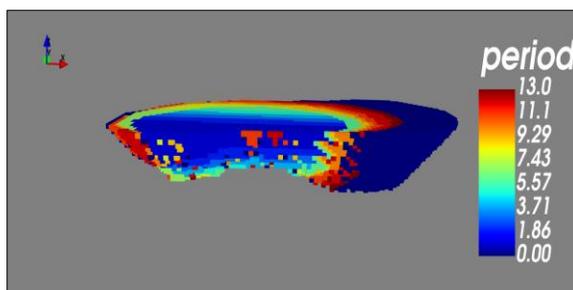


Figura Anexos 5: Agendamiento directo de bloques mediante método de resolución TopoSort

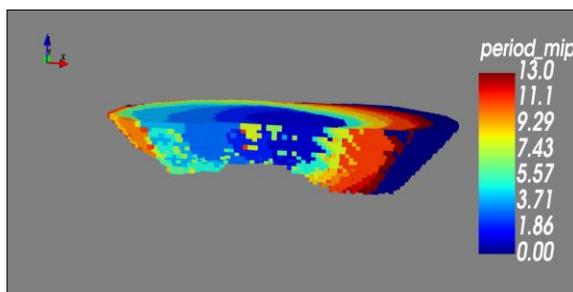


Figura Anexos 6: Agendamiento directo de bloques mediante método de resolución Sliding Window

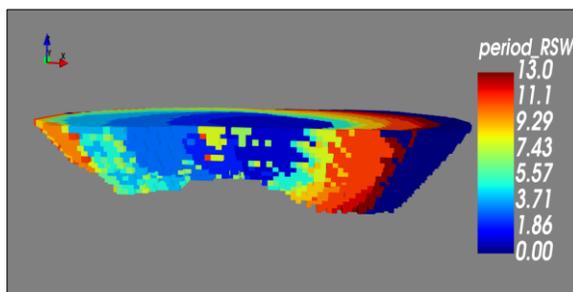


Figura Anexos 7: Agendamiento directo de bloques mediante método de resolución Relaxed Sliding Window

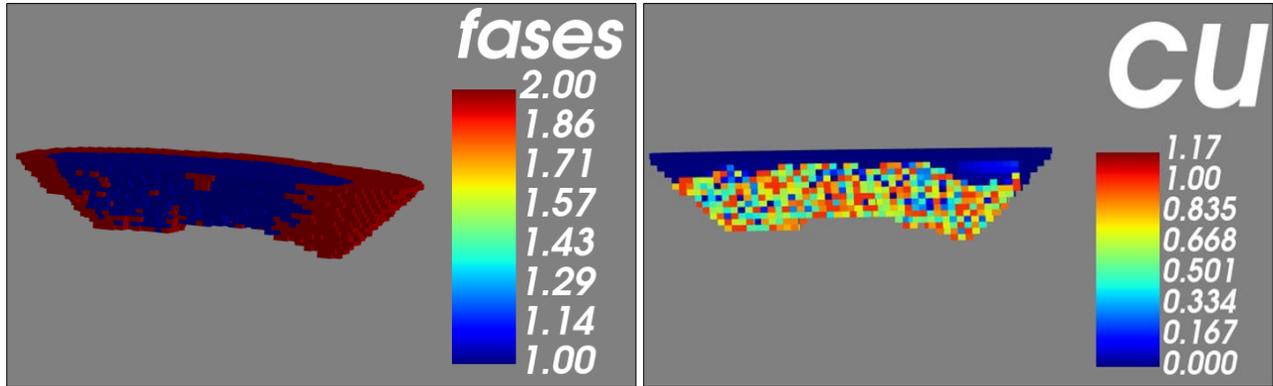


Figura Anexos 8: Variación del desarrollo de fases y cantidad mineral para el min/max lead 0/0

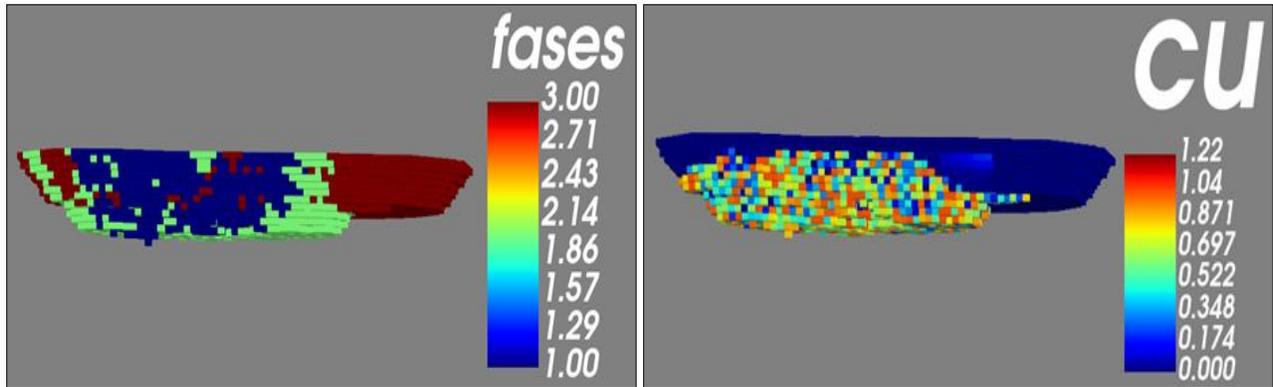


Figura Anexos 9: Variación del desarrollo de fases y cantidad mineral para el min/max lead 1/2.

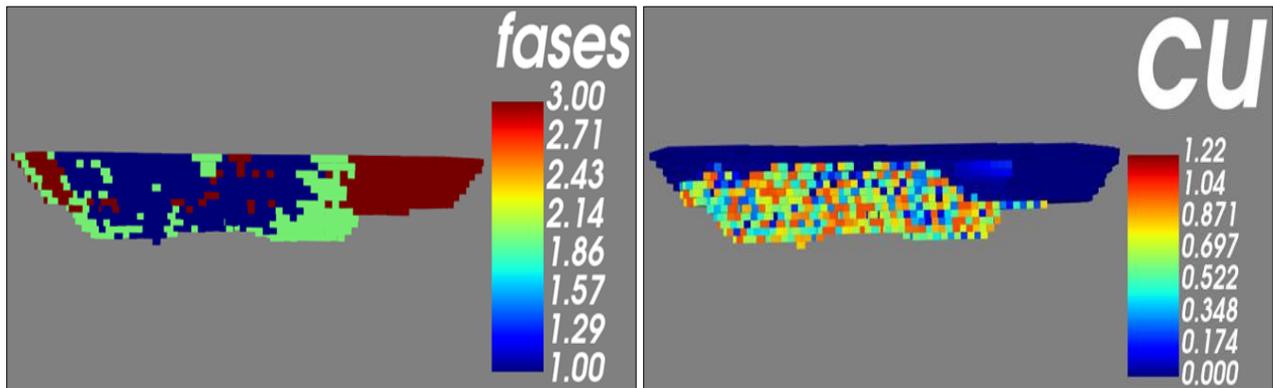


Figura Anexos 10: Variación del desarrollo de fases y cantidad mineral para el min/max lead 2/3.

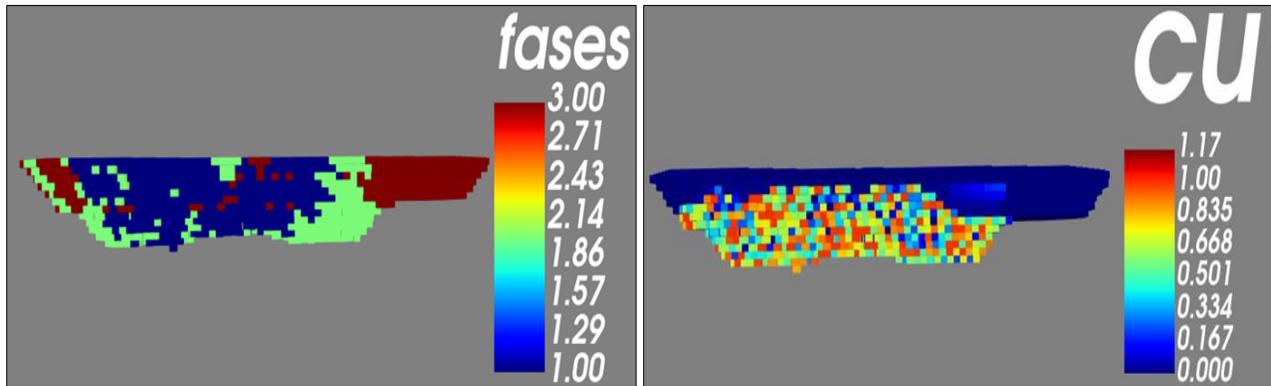


Figura Anexos 11: Variación del desarrollo de fases y cantidad mineral para el min/max lead 3/4.

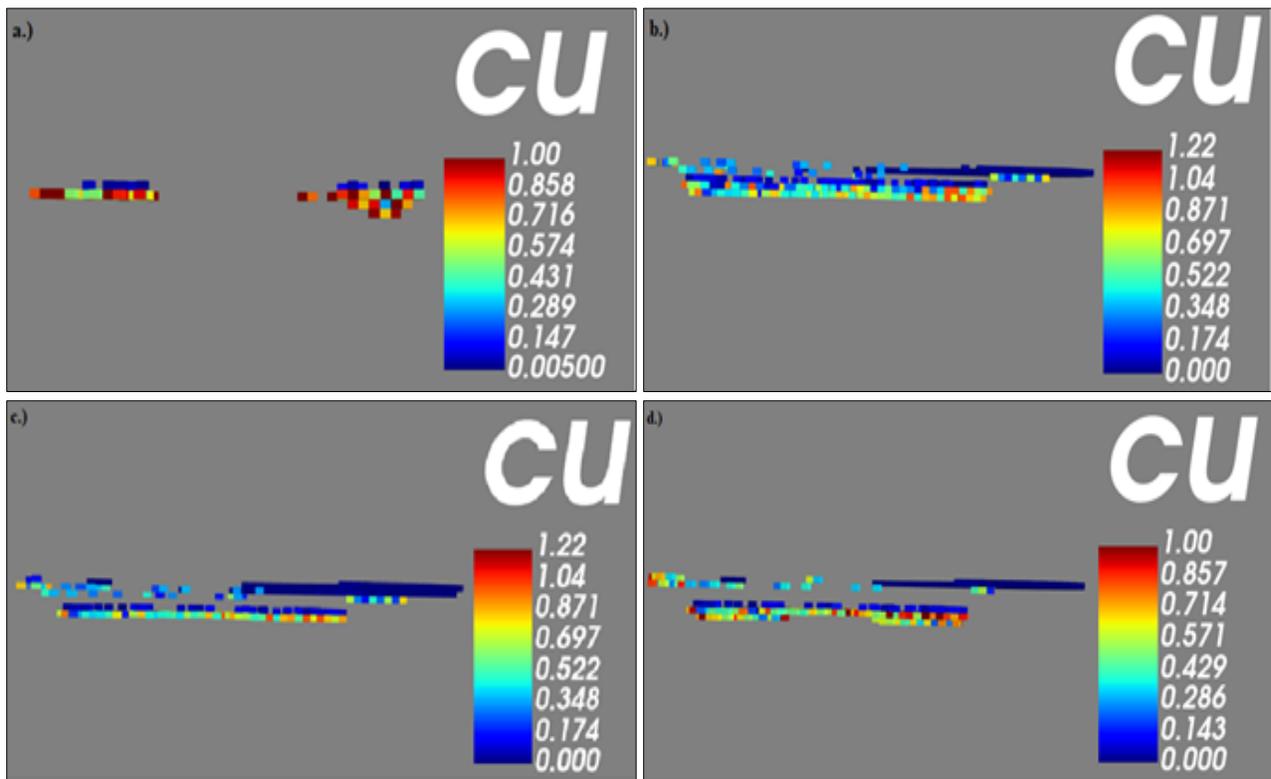


Figura Anexos 12: Mineral sin extraer para cada cambio del min/max lead. a) 0/0. b.) 1/2. c) 3/4. y d.) 3/4.

REFERENCIAS

[1] R. A. Marinho, B. Rairdan, E. Huls, and P. Kolisnyk, "NI 43-101 Technical Report on Quebrada Blanca Phase 2 Región de Tarapacá, Chile," Las Condes, Santiago, Chile, 2019.

[2] A. Paithankar, S. Chatterjee, R. Goodfellow, and M. W. A. Asad, "Simultaneous stochastic optimization of production sequence and dynamic cut-off grades in an open pit mining operation," *Resour. Policy*, vol. 66, no. 101634, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101634>.

[3] A. Paithankar and S. Chatterjee, "Open pit mine production schedule optimization using a hybrid of maximum-flow and genetic algorithms," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 81, no. 105507, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105507>.