

Escuela de Verano 2021: Proyecto Doppler

Autores: Pablo Armijo Carrasco, Marilu Bello Villota, Felipe Castro Gil, Evelyn Toralva Aranda, Luis Valle Vargas.

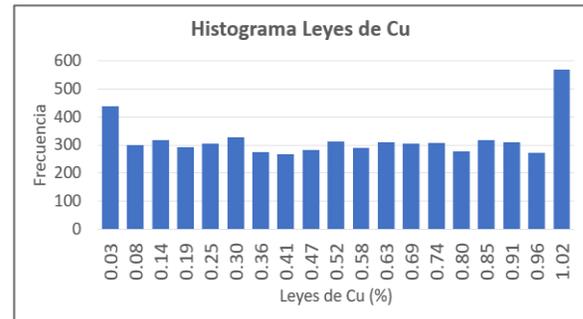
1 ESTADÍSTICAS BÁSICAS DEL YACIMIENTO

1.1 MODELO DE BLOQUES

A partir del modelo de bloques entregado por el mandante Delphos denominado modelo_proyecto.txt, se tiene la siguiente información:

Tabla 1: Datos extraídos del modelo de bloques.

| Modelo de Bloques | |
|-----------------------|----------|
| Numero De Bloques | 116640 |
| Tamaño Bloques [m] | 20*20*15 |
| Mineral [Mt] | 98.7 |
| Estéril [Mt] | 1784.3 |
| Total [Mt] | 1883.0 |
| Ley media ponderada % | 0.53 |



Del histograma de leyes de cobre se desprende que la mayor concentración de leyes se encuentra 1.02%, distribuyendo las demás de forma constante.

1.2 CURVA DE TONELAJE LEY

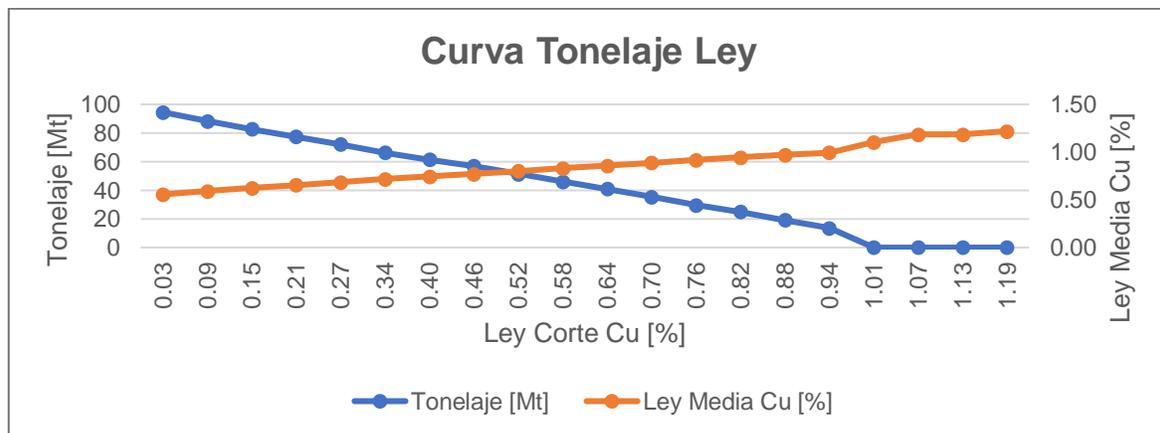


Gráfico 1: Curva tonelaje ley de los recursos mineros.

A partir de la Curva tonelaje ley se tiene que se reportar recursos de 94.5 Mt aproximadamente. Para una ley de corte de 0.4% se reportan recursos de 61.5 Mt con un a ley media de Cu de 0.75 %.

2 CÁLCULO DE PIT FINAL Y PITS ANIDADOS

2.1 INPUTS CÁLCULO DE PIT FINAL

Para determinar el máximo valor de cada bloque, se realizó cálculo de costo asociado a procesamiento y al costo de botadero, eligiendo el máximo valor de estos para tomar la decisión en el cálculo de pit final si su destino es planta o botadero, encontrando la secuencia óptima. Valores se pueden ver en Anexos 2.

En cuanto a las restricciones geotécnicas, para cada unidad se tienen diferentes ángulos de talud y mismo azimut de 360°. Para unidad geológica de estéril se tiene 42°, sulfuros de 45° y óxidos de 48°.

2.2 PIT FINAL

En el cálculo de pit final se tiene un Beneficio total de 1226 MUSD para un total de bloques de 17323 siendo un 15% del total de bloques.

Se puede apreciar en la figura de Anexos 3 que la distribución del pit final tiene en su superficie gran cantidad de estéril.

2.3 PITS ANIDADOS

Para la obtención de los Pits anidados se ingresaron los valores que se muestran en Anexos 4 y se varió el precio del cobre a partir de un revenue factor con saltos de 0.01 desde 0 a 1, obtenido un total de 101 pits anidados. Estos Pits se pueden observar en Anexos 5.

3 SELECCIÓN DE FASES

3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Se tiene un total de 4 fases seleccionadas las cuales se fueron eligiendo a partir del pit by pit, el cual se puede observar en Anexos 5.

Fase 1

- Se selecciona el pit 43 debido que es el primero que presenta un beneficio económico, sin embargo, este tiene un gran contenido estéril en comparación al mineral, teniendo una REM de 1.5.

Fase 2

- En base a fase 1 y 4 seleccionadas se determinó una subdivisión de dos fases que tuvieran mismo tamaño y fueran capaces de llenar planta a una capacidad de 10.9 Mt al año.

Fase 3

- En base a fase 1 y 4 seleccionadas se determinó una subdivisión de dos fases que tuvieran mismo tamaño y fueran capaces de llenar planta a una capacidad de 10.9 Mt al año

Fase 4

- Una vez seleccionado la fase 1, se determinó seleccionar la fase final el cual es el pit 83, en el cual se estabiliza el beneficio total y posterior a este aumenta el contenido de estéril en las fases.

. Las capacidades de las fases y su respectivo beneficio se visualizan en Tabla 2

Tabla 2: Fases seleccionadas para agendamientos.

| RF | Pushback | Total | Esteril | Mineral | REM | Beneficio |
|------|----------|-------|---------|---------|-----|-----------|
| - | - | [Mt] | [Mt] | [Mt] | - | MUSD |
| 0.42 | 43 | 71.9 | 43.0 | 28.9 | 1.5 | 527.2 |
| 0.44 | 45 | 111.2 | 66.7 | 44.5 | 1.5 | 803.7 |
| 0.54 | 55 | 165.4 | 104.0 | 61.4 | 1.7 | 1071.9 |
| 0.82 | 83 | 255.7 | 178.4 | 77.2 | 2.3 | 1221.1 |

4 AGENDAMIENTO (CONVENCIONAL Y DBS)

4.1 AGENDAMIENTO CONVENCIONAL

La creación del plan minero convencional se determinó a partir de las 4 fases seleccionadas anteriormente, además de: capacidad de mina, capacidad de planta y tasa de descuento para un total de 365 días de producción. Los inputs se ven en Anexos 8. Para encontrar un plan que fuera más armónico, se modificaron los valores del máximo y mínimo de bancos, en la que una fase posterior puede comenzar su extracción, para esto se usaron los valores dados en la tabla de Anexos 9.

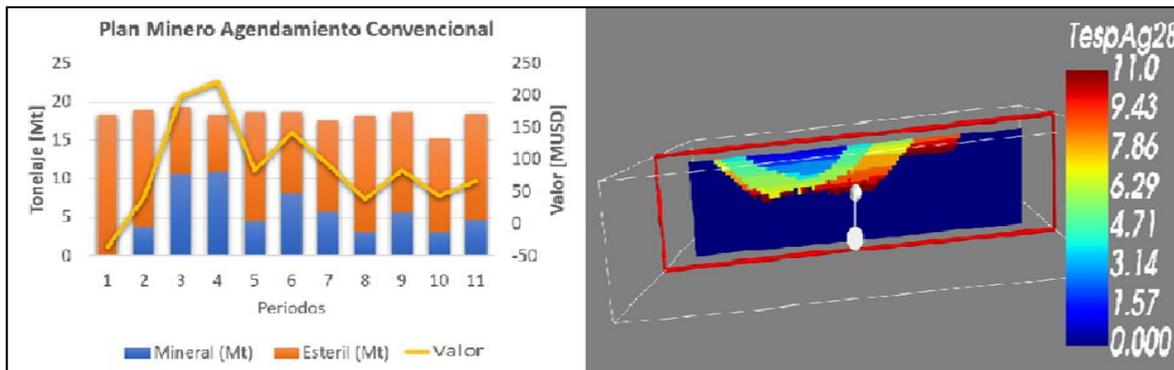


Figura 1: A la izquierda se muestra el plan minero obtenido. A la derecha vista en perfil de los agendamientos.

El VAN del agendamiento convencional es de 571 MUSD para un total de 11 periodos.

En la Figura 1 se puede observar a la izquierda el plan minero, el cual tiene un ramp up el primer y segundo año, debido que la primera fase traía una gran cantidad de estéril en superficie. Alcanza lo solicitado por la planta para los años 3 y 4, para luego tener alzas y bajas a lo largo de los periodos, producto que la capacidad total de la mina no logra extraer la cantidad de mineral solicitado, ya que tiene una REM media de aproximadamente 2.

Se tiene, además, que el plan de producción considera las 4 fases dentro del plan, sin embargo, la fase 4 solo considera una pequeña porción del 30%, producto de la cantidad muy alta de estéril, lo que no es extraído debido que genera mayor beneficio económico. La secuencia de fase se puede observar en Anexos 10.

4.2 AGENDAMIENTO DBS

El agendamiento por DBS no necesita la selección de fases, sino que busca una secuencia óptima a partir del modelo de bloques: Para lo anterior se tomaron los inputs de capacidad mina, capacidad de planta y tasa de descuento generando opciones de destino de material y de capacidad. El proceso iterativo se realizó para 11 periodos para poder comparar con el agendamiento convencional.

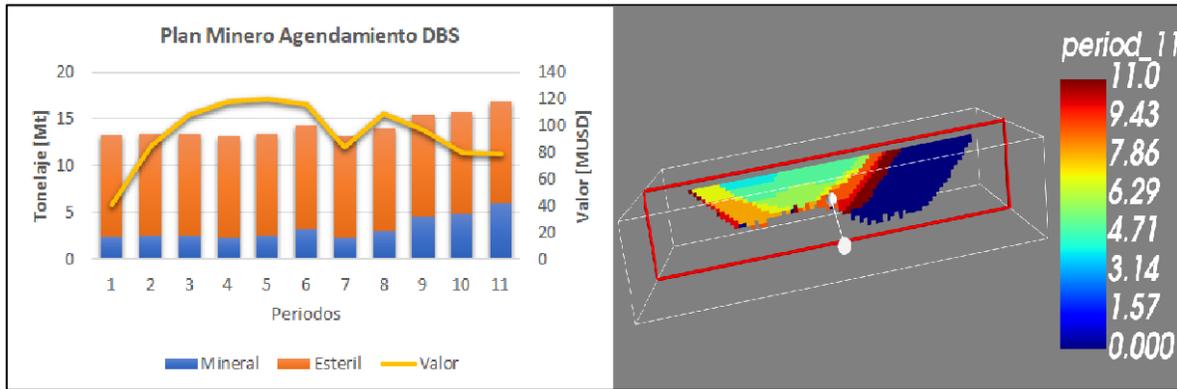


Figura 2: A la izquierda se muestra el plan minero obtenido. A la derecha vista en perfil de los agendamientos

El VAN mediante agendamiento por DBS es de 602 [MUSD] para un total de 11 periodos.

En la figura 2 a la derecha, se puede observar que la mineralización se comporta de una forma más armónica, sin embargo, no cumple con los requerimientos de la planta, producto de la capacidad de mina es muy baja para poder mover todo ese mineral de 10.9 Mt al año.

5 COMPARACIÓN AGENDAMIENTO CONVENCIONAL Y DBS

A partir de los agendamientos obtenidos se puede tener las siguientes comparaciones:

- El método por DBS no considera la creación de fases, sino que establece la optimización directamente desde el modelo de bloques, por lo que su ejecución es más simple, pero se debe tener cuidado con la secuencia obtenida.
- EL valor actual neto para los agendamientos es mayor para el DBS en 31 MUSD, que representa un 9.5% de ganancia.
- El DBS no considera ramp up, por lo que extrae mineral desde el primer año, agregando valor económico desde antes.
- La geometría de los periodos, se comportan de forma similar, sin embargo, el DBS es menor en tamaño que el Convencional, lo que podría traer como consecuencia mayores dificultades en la operativización, se puede apreciar en la Figura 2, como el periodo 11 extrae por todo el borde del pit, lo que no sería posible de realizar en la operación.
- El comportamiento de la extracción de mineral es más armónico para el DBS, quiere decir que tiene un movimiento a planta más estable.

6 ANÁLISIS DE AGENDAMIENTO CONVENCIONAL

Para el análisis de agendamiento convencional se analizaron diferentes condiciones para su realización, como lo es selección de fases más grandes (3 fases) y variación entre el máx y el mín de bancos a extraer en fase posterior lo que arrojó diferentes resultados.

6.1 AGENDAMIENTO CONVENCIONAL PARA 3 FASES.

A partir del pit by pit que se tiene en Anexos 5, se seleccionan pushback que tienen mayor tonelaje, cumpliendo con un total de 3 fases, las cuales fueron:

Tabla 3: Fases seleccionadas análisis de agendamiento convencional.

| RF | Pushback | Total [Mt] | Esteril [Mt] | Mineral [Mt] | REM | Beneficio MUSD |
|------|----------|------------|--------------|--------------|-----|----------------|
| - | - | | | | - | |
| 0.42 | 43 | 71.9 | 43.0 | 28.9 | 1.5 | 527.2 |
| 0.49 | 50 | 150.2 | 92.8 | 57.4 | 1.6 | 1013.1 |
| 0.93 | 94 | 273.3 | 193.9 | 79.4 | 2.4 | 1225.8 |

Los resultados de agendamiento para estas fases fueron:

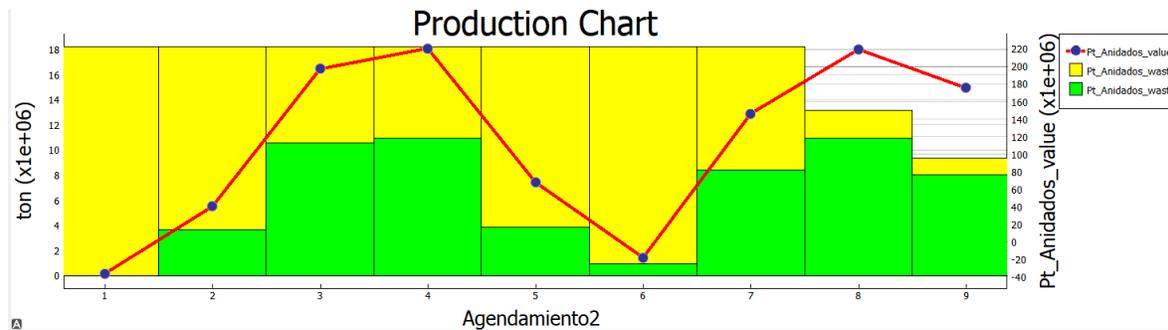


Figura 3: plan minero mediante agendamiento convencional.

El Valor actual neto del plan de la Figura 3 fue de 583 MUSD para un periodo de 9 años, el cual es superior al plan desarrollado para las 4 fases que era de 571 MUSD, sin embargo, se puede apreciar que el movimiento a planta es muy irregular, por lo que no puede ser considerado para un futuro diseño minero. Además, el plan solo considera la fase 1 y fase 2.

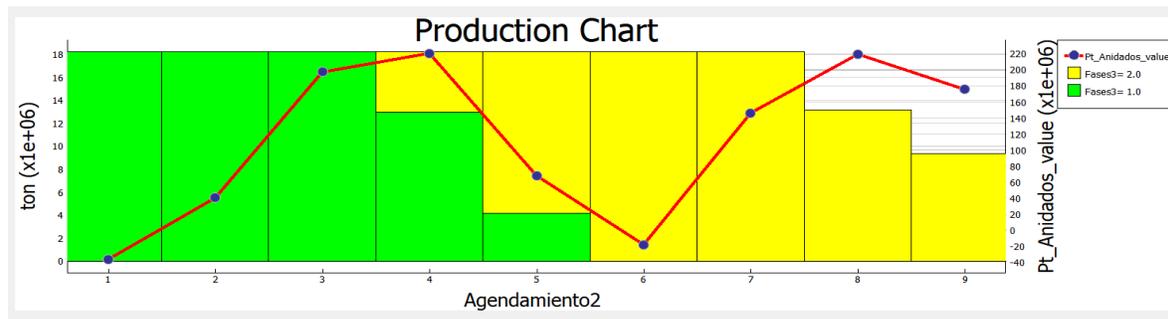


Figura 4: Distribución de fases en el agendamiento de 3 fases.

7 CAPACIDAD MÁXIMA DE PLANTA.

Para lograr un cumplimiento a planta como lo solicita el mandante de 10.9 Mt por año se realizó una variación en la capacidad mina en que se mueve todo el material, la cual se encontró un óptimo en una capacidad de 95 Mt. En la Figura 5, se presenta el plan minero obtenido bajo esta condición. El Agendamiento fue realizado de manera convencional para las mismas 4 fases que se presentan en Figura 1: A la izquierda se muestra el plan minero obtenido. A la derecha vista en perfil de los agendamientos..

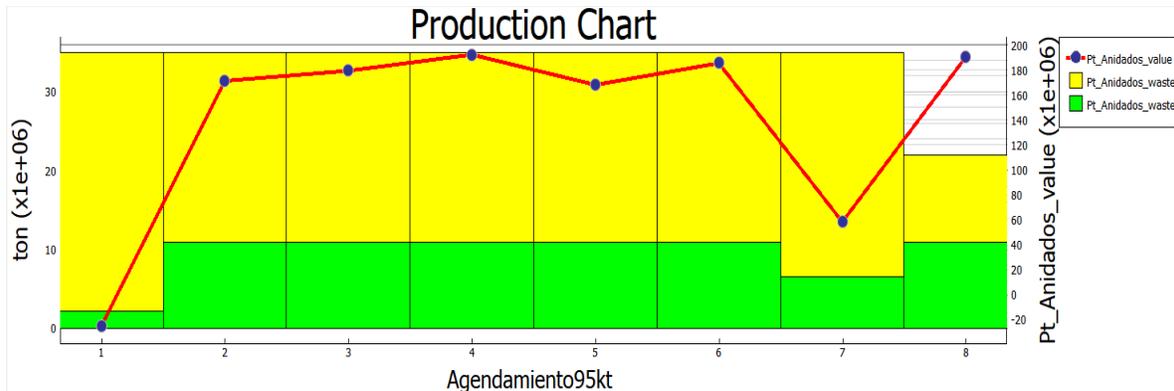


Figura 5: Plan minero para capacidad óptima de alimentación a planta.

Al aumentar la capacidad mina es posible llenar planta desde el año 2, por lo que se genera un VAN de 712 MUSD, estando en un 20% por sobre el plan. Si bien se cumple con los requerimientos de la planta, al mover más cantidad de mineral, se necesitará con una mayor inversión de equipos mineros.

8 ANÁLISIS DE SECUENCIA AGENDAMIENTO DBS

Para Agendamiento DBS realizado en el caso base de 11 periodos, este tenía un VAN de 602 MUSD. Para analizar el comportamiento y el avance del pit, se realizó la secuencia desde el periodo 8 al año 18.

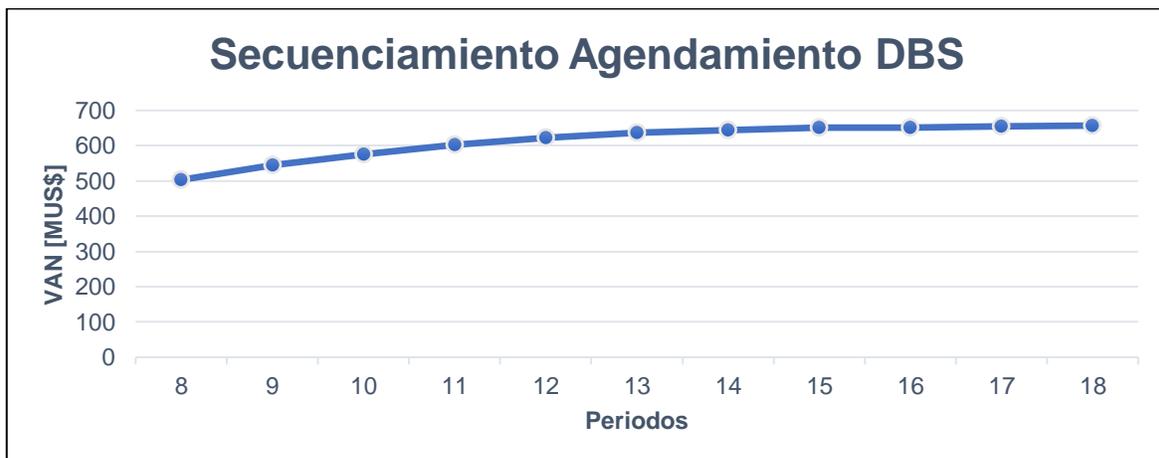


Gráfico 2: Secuenciamiento de agendamiento DBS.

Se puede apreciar en el Gráfico 2, que el VAN aumenta a medida que los periodos aumentan, logrando estabilizar para el periodo 13 aproximadamente alcanzando un VAN de 636 MUSD, lo que significa que el agendamiento óptimo debiese realizarse para esta cantidad de años para obtener el mayor beneficio económico y no generar mayor impacto por la extracción de estéril. Los perfiles de secuencia y planes mineros pueden apreciarse en Anexos 11, Anexos 12, Anexos 13, Anexos 14 y Anexos 15.

9 IMPLICANCIAS DE AGENDAMIENTO EN EL DISEÑO MINERO

Las implicancias que se tienen en el diseño minero a partir del agendamiento tienen directa relación con la forma de extracción que tienen los periodos y del espacio operacional que dentro de este se pueda tener.

Para este ejercicio se comparan los resultados obtenidos por un agendamiento convencional y el agendamiento por DBS.

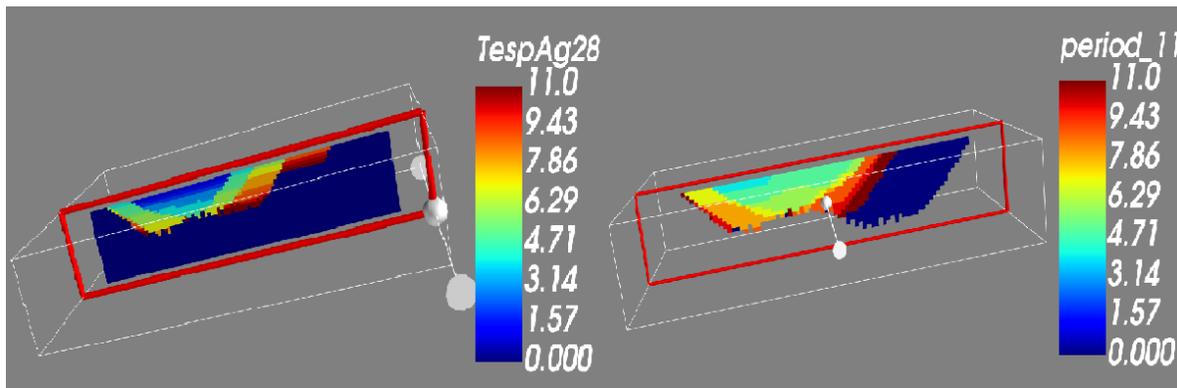


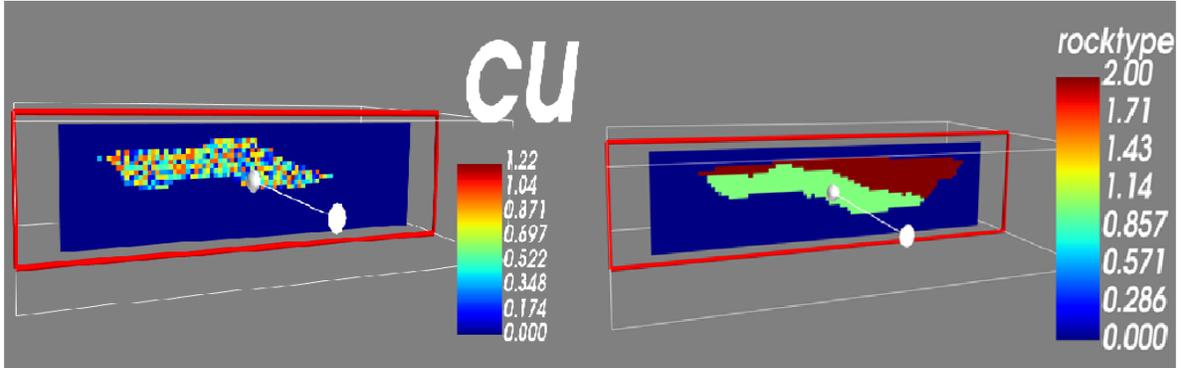
Figura 6: A la izquierda perfil de Agendamiento convencional. A la derecha perfil XZ agendamiento DBS:

A partir de la Figura 6 se desprende que el agendamiento convencional presenta una geometría operacionalmente más adecuada, debido que cumple con los ángulos de talud y se logra ver espacio operacional para los equipos. Sin embargo, el agendamiento DBS presenta periodos que no cumplen con una distancia óptima de trabajo, ya que están muy cerca a las paredes generadas en años anteriores, por lo que se complicaría la creación de rampas en esos periodos y no habría un espacio operacional óptimo para el trabajo correcto de los equipos.

Si bien el plan DBS entrega mejores resultados, es necesario cumplir con las restricciones geométricas, ya que en el diseño minero se tendría que agrandar esos espacios y es muy probable que el valor económico disminuya considerablemente al estar agregando mayor cantidad de estéril al plan.

10 ANEXOS

10.1 VISUALIZACIÓN MODELO DE BLOQUES



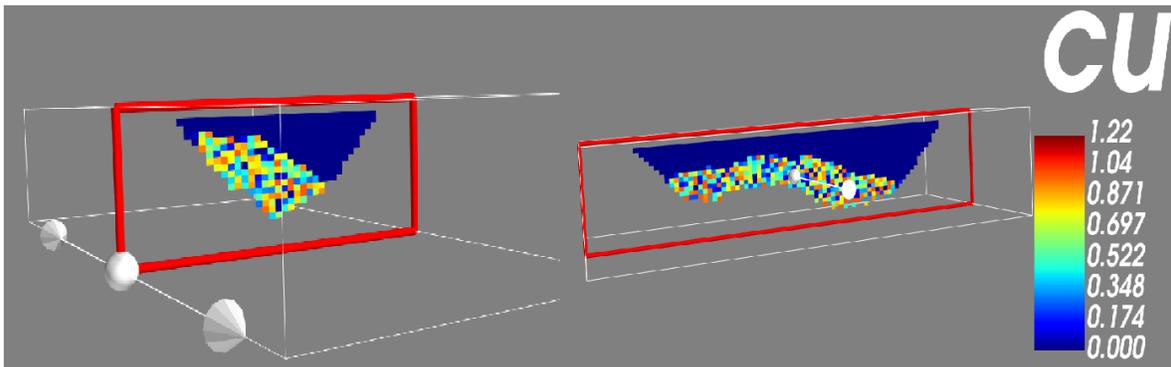
Anexos 1: A la izquierda Perfil de Distribución de leyes. A la derecha Perfil unidades geológicas: Sulfuros (verde), Óxidos (marrón) y Estéril (azul).

10.2 INPUTS PIT FINAL

| Valor Máximo (USD) | |
|--------------------|--------|
| Min | -32760 |
| Promedio | -16699 |
| Máximo | 771065 |

Anexos 2: Valores Máx, Min y Promedio de costo de oportunidad de bloques.

10.3 VISUALIZACIÓN PIT FINAL



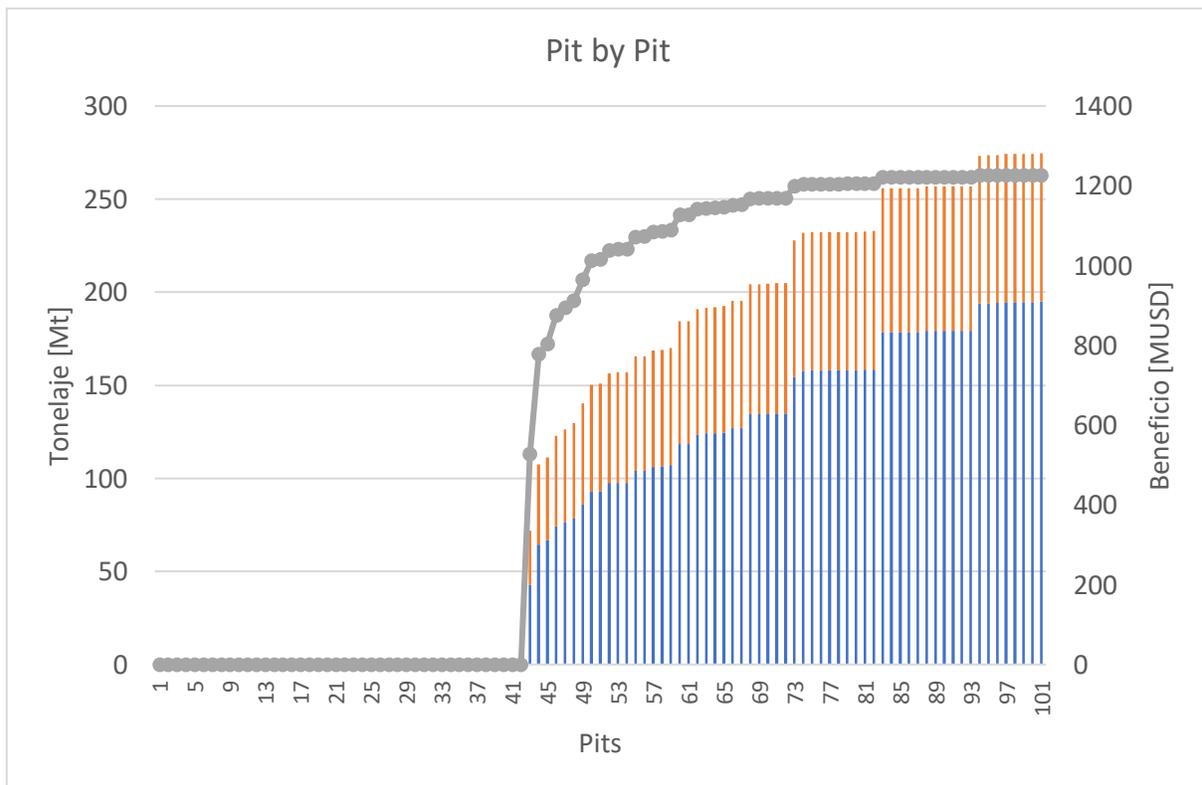
Anexos 3: Pit final con su respectiva distribución de leyes. A la izquierda perfil YZ, a la derecha perfil XZ.

10.4 INPUTS PITS ANIDADOS

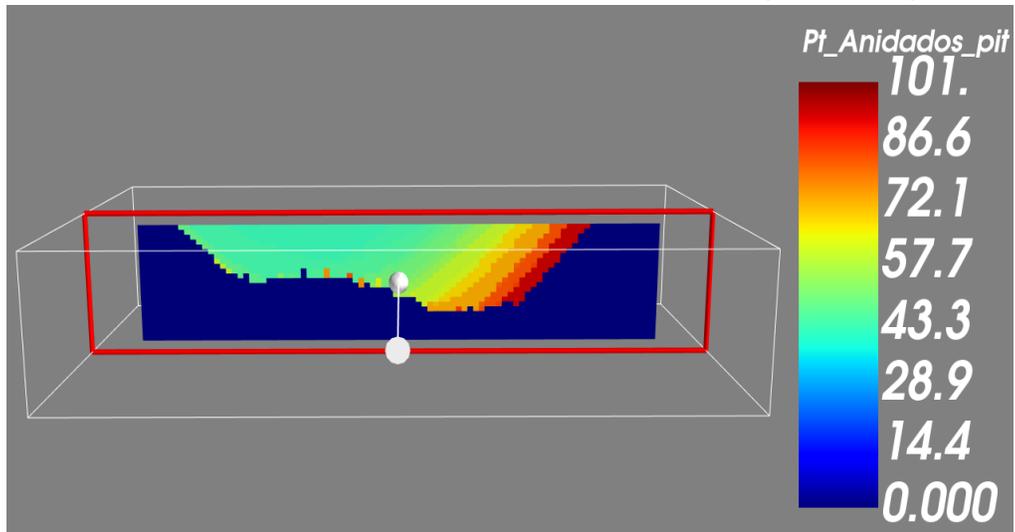
| Datos De Entrada calculo Nested Pits | |
|--------------------------------------|----------------------|
| Precio | 2,8 [US\$/lb] |
| Factor de conversión | 2204,62 |
| Recuperación | columna recuperación |
| Costo de venta | 0,15[US\$/lb] |
| Ley % | columna de leyes |
| Revenue factor | [0-1] |
| Step Revenue factor | 0,01 |

Anexos 4: Inputs para obtención de pits anidados.

10.5 PIT BY PIT

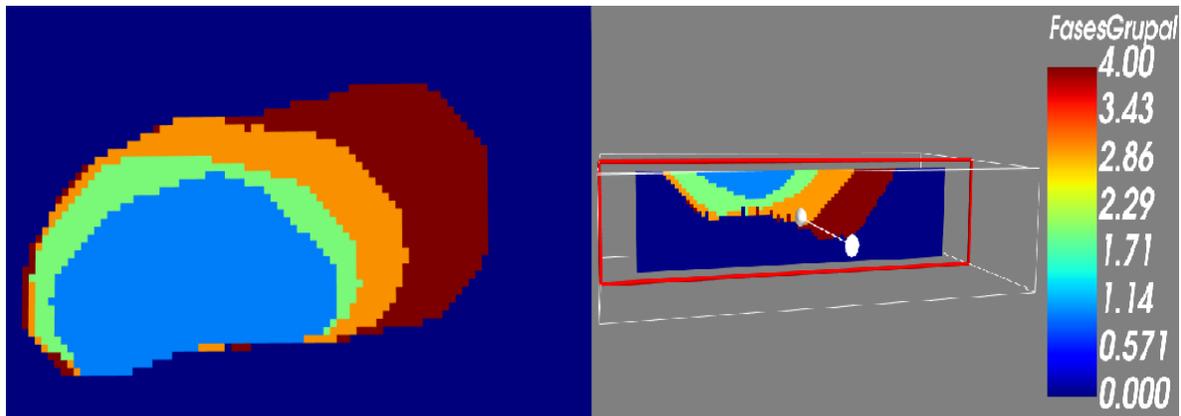


Anexos 5: Pit by pits.



Anexos 6: vista en perfil de pits anidados.

10.6 VISUALIZACIÓN DE FASES



Anexos 7: Visualización de fases. A la izquierda corte XY, a la derecha corte XZ.

10.7 INPUTS AGENDAMIENTO CONVENCIONAL Y DBS

| Inputs Agendamiento Convencional y DBS | | |
|--|------------------|-------------------|
| Capacidad Mina | Capacidad Planta | Tasa de Descuento |
| [Mt] | [Mt] | % |
| 18.25 | 10.95 | 10 |

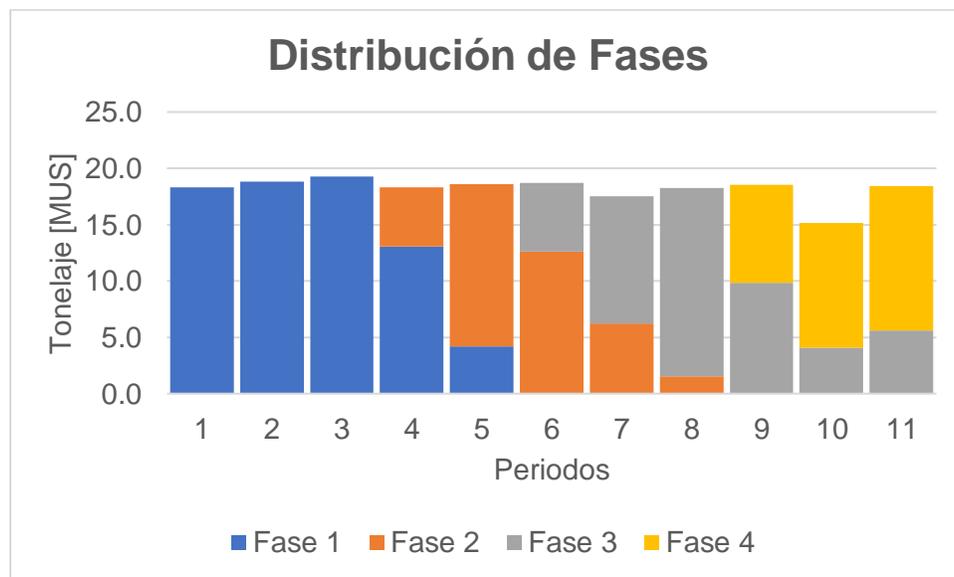
Anexos 8: inputs agendamiento convencional y DBS.

10.8 NÚMERO DE BANCOS (MÍN Y MÁX)

| Fases | Número de Bancos | |
|-------|------------------|-----|
| | Mín | Máx |
| 2 | 1 | 6 |
| 3 | 2 | 6 |
| 4 | 0 | 0 |

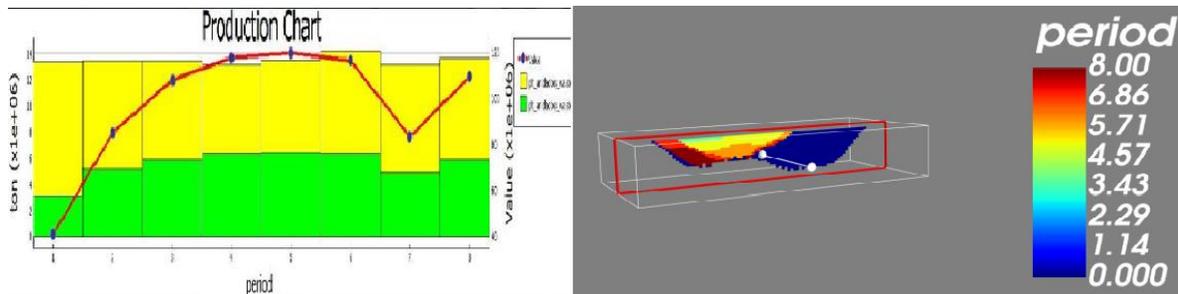
Anexos 9: Mín y Máx de bancos entre fases.

10.9 DISTRIBUCIÓN DE FASES

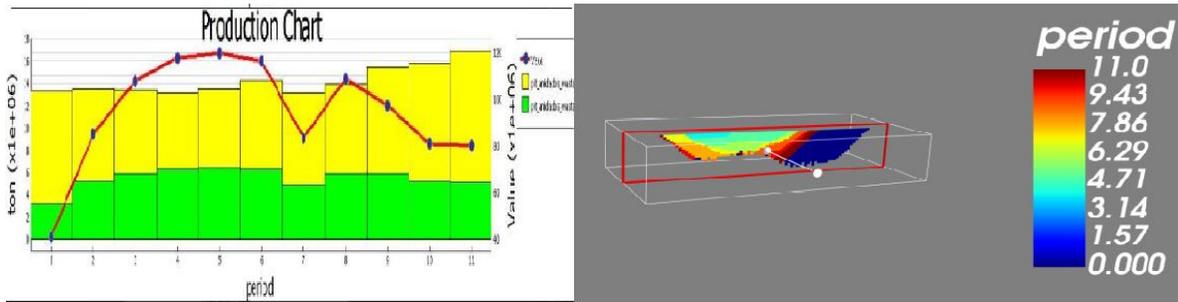


Anexos 10: Distribución de fases.

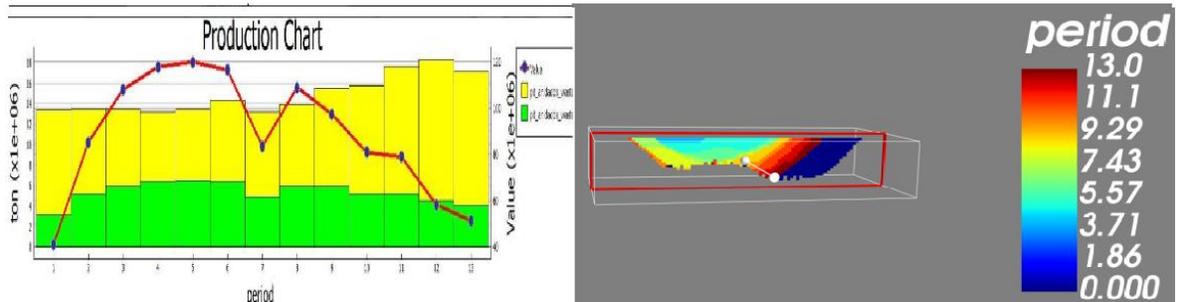
10.10 SECUENCIA DE AGENDAMIENTO DBS



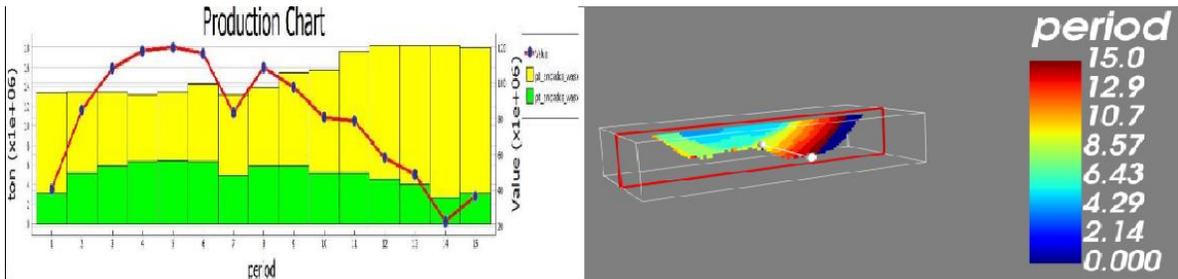
Anexos 11: Secuencia DBS para periodo 8.



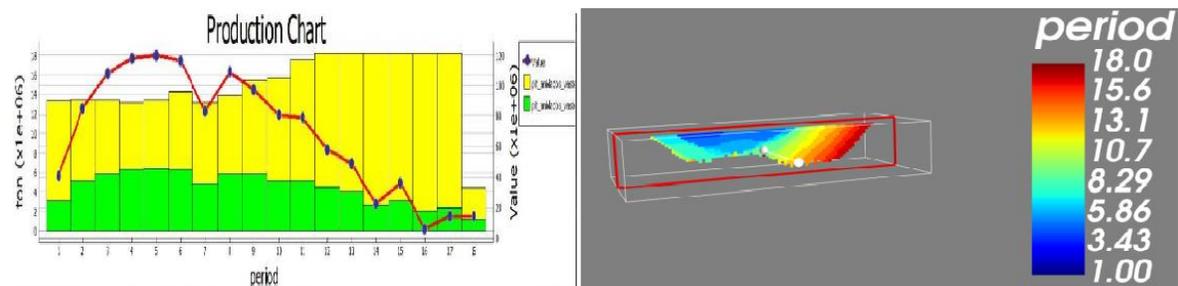
Anexos 12: Secuencia DBS para periodo 11.



Anexos 13: Secuencia DBS para periodo 13



Anexos 14: Secuencia DBS para periodo 15.



Anexos 15: Secuencia DBS para periodo 18