

Secuencia óptima de extracción de caserones en minería subterránea selectiva: Un caso de estudio

Valentina Rojas
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS
AMTC
DIMIN
Universidad de Chile
Email: vrojas@delphoslab.cl

Gonzalo Nelis
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS
AMTC
DIMIN
Universidad de Chile
Email: gnelis@delphoslab.cl

Nelson Morales
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS
AMTC
DIMIN
Universidad de Chile
Email: nmorales@delphoslab.cl

Abstract—A través de la aplicación de un modelo matemático que maximiza el valor presente neto de un agendamiento, se estudia el cambio en la secuencia de extracción de un sector productivo de una mina subterránea explotada por el método Bench & Fill, al considerar en el modelo restricciones de precedencia del tipo "o".

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este estudio es comparar y cuantificar el efecto que tienen las relaciones de precedencia tipo "o" sobre la secuencia de construcción y de producción de un caso de estudio de una mina subterránea explotada por el método Bench & Fill.

II. MODELO MATEMÁTICO

Para modelar la secuencia de extracción de un Bench & Fill, se utiliza un modelo de secuenciamiento general de actividades llamado Universal Delphos Sequencer and Scheduler (UDESS). Este modelo busca maximizar el valor presente neto del agendamiento, sujeto a restricciones de recursos y precedencias entre ellas, generando una carta Gannt de desarrollo de las actividades. Se explicará a continuación sus principales características. Consideremos un conjunto de periodos $t = 1, \dots, T$, un conjunto de actividades $i = 1, \dots, A$ que deben ser agendadas, $r = 1, \dots, R$ un conjunto de recursos que pueden ser consumidos por el inicio, término y desarrollo de cada actividad i , y que tienen cierta disponibilidad en cada periodo t . Cada actividad i tiene un costo/beneficio ν_i asociado a su desarrollo, y ν_i^+, ν_i^- asociados a su inicio y término, con una tasa mínima y máxima ($v_{min,i}, v_{max,i}$) que limita el progreso de cada actividad durante cada periodo t . Finalmente, cada actividad i tiene asociado un conjunto de actividades predecesoras dado por $P(i)$.

Las variables de decisión de este modelo son:

- p_{it} : Porcentaje de progreso de la actividad i en el periodo t (Variable continua entre 0 y 1).
- s_{it}, e_{it} : Variables de inicio y término respectivamente para la actividad i . (Binaria: 1 si la actividad i empieza/termina en el periodo t o antes, 0 en caso contrario, respectivamente)

- k_{iPt} : Variable que establece relaciones de precedencia entre la actividad sucesora i y un grupo de actividades precedentes $P \in P(i)$ (Binaria, 1 si todas las actividades del grupo $P \subseteq P(i)$ están terminadas en el periodo t , 0 en caso contrario)
- τ_{it} : Tiempo consumido por la actividad i en el periodo t y sus predecesores.

La función objetivo viene dada por:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \beta^{\gamma t} \sum_{i \in A} (\nu_i p_{it} - \nu_i^+ \Delta s_{it} - \nu_i^- \Delta e_{it}) \quad (1)$$

Con $\beta = \frac{1}{(1+\alpha)^{1/12}}$ y α la tasa de descuento anual. γ_t es el tiempo acumulado hasta el periodo t , y Δ indica la diferencia entre la variable en el periodo t y $t - 1$.

El conjunto de restricciones principales viene dado por:

- **Límite de recursos:** Cada actividad i puede consumir $\lambda_{i,r}$ cantidad de recursos r durante su desarrollo. Esta restricción limita los recursos r consumidos en cada periodo (dado por $R_{min,t}^r, R_{max,t}^r$ respectivamente) para todas las actividades
- **Límites de progreso:** Es posible exigirle a cada actividad i una tasa mínima o máxima de progreso en el periodo t (límites dados por $b_{i,t}^-, b_{i,t}^+$ respectivamente)
- **Límites de recursos en un intervalo:** Se le exige a las actividades un consumo mínimo (R_m^r) y máximo (R_M^r) de recurso r durante cierto intervalo de tiempo ($[t_{min}^r, t_{max}^r]$).
- **Límites de recursos al iniciar y terminar:** Es posible modelar que las actividades i consuman recurso r al iniciar o terminar su progreso (dado por $\lambda_{i,r}^+$ y $\lambda_{i,r}^-$ respectivamente), el cual debe estar en cierto rango dado por $[S_{min,t}^r, S_{max,t}^r]$ para el caso del inicio, y $[E_{min,t}^r, E_{max,t}^r]$
- **Incompatibilidad de actividades:** Es posible modelar que cierto conjunto de actividades no pueda iniciar durante un intervalo de tiempo determinado.
- **Forzar Inicio:** Es posible forzar el inicio de un conjunto de actividades C entre cierto intervalo dado por $[t_{min}^C, t_{max}^C]$.

- **Precedencias:** Cada actividad i posee un conjunto de precedencias $P(i)$ que puede ser dividido en **grupos** $P \subseteq P(i)$. La precedencia puede generarse como tipo "y": Todos los grupos del conjunto $P(i)$ deben ser terminados antes de empezar la actividad i , o como tipo "o", donde se requiere que se finalice al menos uno de los grupos $P \subseteq P(i)$ para poder empezar la actividad i .

III. CASO DE ESTUDIO

Los datos utilizados en el presente caso de estudio corresponden a un proyecto minero situado en sudamérica. El cuerpo mineralizado es del tipo vetiforme, con presencia de minerales de oro y plata de alta ley. El método de explotación es Bench & Fill. La Mina Y posee dos sectores productivos y 43 niveles en total.

Para probar el modelo matemático, se considera el primer nivel de uno de los sectores productivos de la Mina Y, el cual corresponde al nivel de transporte principal de dicho sector productivo. La Figura 5 muestra una vista en planta de dicho nivel.

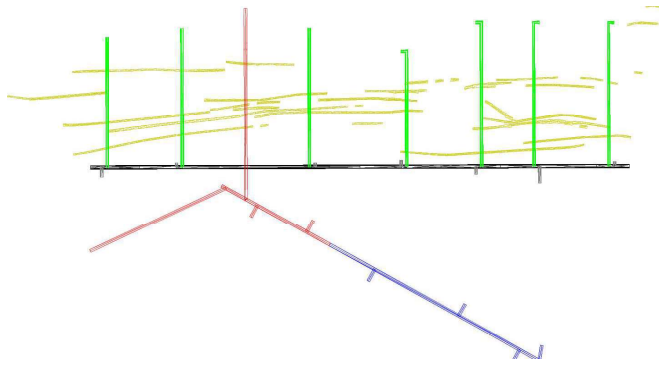


Fig. 1. Vista en planta, nivel 1175, Mina Y.

En la Figura 5, se pueden ver los principales desarrollos del nivel. La línea negra corresponde a la galería o **drift principal**, por donde circulan los equipos desde y hacia el interior de la mina. Las líneas verdes representan los **cruzaos**, los cuales proveen el acceso a las vetas que contienen el mineral (en color amarillo) a través de los **drift de extracción**, los cuales corresponden a galerías que siguen el sentido de las vetas. Sobre estas vetas se diseñan ciertas unidades básicas de explotación llamadas **caserones**, los cuales poseen un cierto tonelaje de mineral y ley media como atributos principales.

A. Secuencia de Extracción

Al tratarse de sólo un nivel de la mina, se considera una versión modificada del método Bench & Fill.

La secuencia comienza con el desarrollo completo de un cruzado y continúa con el desarrollo de los drift de extracción conectados a dicho cruzado, tal como lo muestra la Figura 2.

Una vez desarrollados los cruzaos y los drifts de extracción, se procede a realizar la extracción de los caserones *en retroceso*, es decir, desde el fondo del drift de extracción hacia su conexión con el cruzado correspondiente.

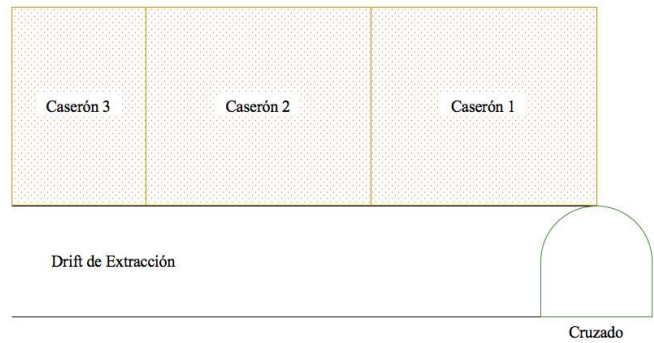


Fig. 2. Vista en perfil, secuencia constructiva Mina Y.

De esta forma, se puede establecer una secuencia general de actividades, la cual considera dos actividades:

Desarrollos Horizontales → Extracción

B. Metodología

La Figura 3 muestra un esquema de la metodología general utilizada en este estudio.

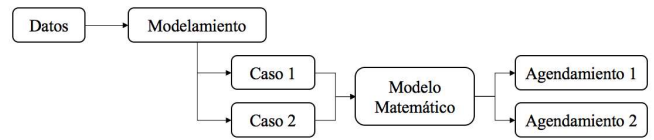


Fig. 3. Metodología aplicada.

A partir de datos reales de un proyecto minero, se definen las actividades y sus respectivas relaciones de precedencia, las cuales dependen directamente del método de explotación. Se construyen dos casos:

- Caso 1, donde las relaciones de precedencia consideradas son sólo del tipo "y".
- Caso 2, donde las relaciones de precedencia consideradas incluyen algunas del tipo "o".

En el caso 1, se definió *a priori* la cantidad de caserones que son extraídos por cada uno de los cruzaos, lo que deja el modelo sólo con precedencias tipo "y". En la Figura 4, a la izquierda, se pueden observar dos cruzaos 7 y 8 con sus respectivos grupos de caserones. Los caserones de rojo salen por el cruzado 7, mientras que los caserones de azul salen por el cruzado 8.

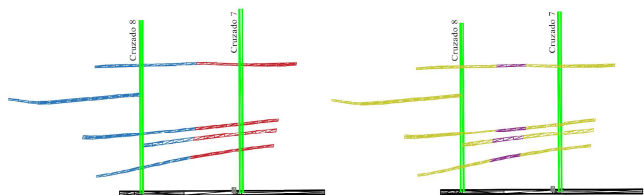


Fig. 4. Precedencias tipo "y" (izquierda) y tipo "o" (derecha).

En el caso 2, dada la continuidad de las vetas, se decidió liberar los caserones que se encuentran entre dos cruzados de la decisión de ser extraídos por un cruzado o por el otro. En la Figura 4, a la derecha, se pueden observar ciertos caserones pintados de morado, los cuales pueden ser extraídos desde el cruzado 7 o desde el cruzado 8, definiendo así relaciones de precedencia del tipo "o".

Una vez definidos los casos a analizar, se procede al modelamiento de los datos.

C. Modelamiento

El modelamiento consiste en definir las actividades que serán consideradas, sus respectivas relaciones de precedencia y las restricciones operacionales correspondientes a la capacidad productiva de la mina. Las actividades consideradas en el modelamiento de la Mina Y son:

- Desarrollos horizontales
- Extracción

Cada una de estas actividades posee distintos atributos, como los metros a desarrollar, el tonelaje de mineral asociado al desarrollo de galerías, tonelaje de producción por caserón extraído, ingresos, costos y la tasa mensual máxima (max rate) a la que se puede desarrollar dicha actividad.

Las actividades mencionadas anteriormente deben obedecer a ciertas relaciones de precedencia, definidas por el método de explotación ya mencionado. Además, se considera un ritmo de producción de 1,000 tpd como restricción operacional.

Luego, en base a las actividades y sus atributos, a restricciones operacionales y relaciones de precedencia, el modelo matemático encuentra la secuencia que maximiza el NPV asociado.

IV. RESULTADOS

Una vez implementado el modelo matemático a los dos casos mencionados anteriormente, se puede observar un cambio significativo en la secuencia, tanto de desarrollos como de producción.

Debido a la gran cantidad de datos, se tomarán dos ejemplos para mostrar el cambio, tanto en la secuencia constructiva como productiva.

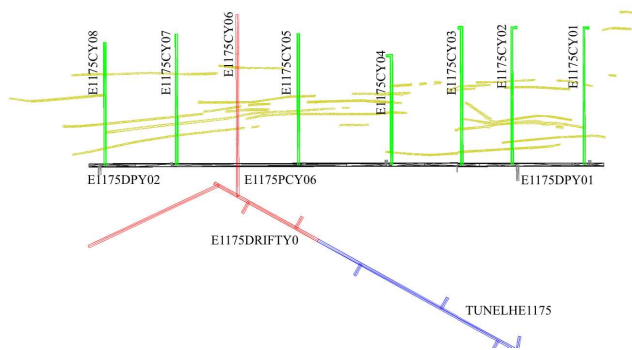


Fig. 5. Infraestructura de acceso, nivel 1175, Mina Y.

Como se puede observar en la Tabla I, existen cambios en la secuencia de las actividades de construcción de la infraestructura de acceso a la mina.

TABLE I
PERÍODOS DE EXTRACCIÓN EN CRUZADO 6.

	Caso 1	Caso 2
TUNELHE1175	1	1
E1175DRIFTY0	2	1
E1175PCY06	4	3
E1175DPY01	4	4
E1175DPY02	4	5
E1175CY01	11	11
E1175CY02	11	11
E1175CY03	11	11
E1175CY04	11	11
E1175CY05	11	11
E1175CY06	7	6
E1175CY07	7	11
E1175CY08	7	7

Finalmente, el cambio en la secuencia de extracción de los caserones, se puede ejemplificar tomando los cinco caserones ubicados en el cruzado 6, en el drift de extracción T01I, como se observa en la Tabla II.

TABLE II
PERÍODOS DE EXTRACCIÓN EN CRUZADO 6.

Caserón	Caso 1	Caso 2
E1175CY06T01I01	13	17
E1175CY06T01I02	13	17
E1175CY06T01I03	13	13
E1175CY06T01I04	12	12
E1175CY06T01I05	12	10

V. CONCLUSIONES

Incluir restricciones tipo "o" en el agendamiento de actividades de construcción y producción de una mina produce cambios en la secuencia de ejecución de las actividades, sin afectar mayormente el plan de producción. La incorporación de este tipo de relaciones de precedencia permite tener una mayor flexibilidad en los planes de preparación y producción, y por lo tanto, ser más cercanos a la realidad operacional.

ACKNOWLEDGMENT

Los autores agradecen el apoyo del Advanced Mining Technology Center (Fondo Basal FB0809) en el desarrollo de este trabajo. El segundo autor agradece el apoyo del proyecto CONICYT PIA Anillo ACT1407.

REFERENCES

- [1] A. Newman and M. Kuchta, *Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine*, European Journal of Operational Research 176 (2007), 1205 - 1218.
- [2] W. Rocher, N. Morales and E. Rubio, *Secuenciamiento de Preparación y Desarrollo Minero en Faenas Subterrneas*, Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile. 62 Convención Anual Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (2011), Calama, Chile.
- [3] P. Trout, *Underground Mine Production Scheduling Using Mixed Integer Programming*, APCOM XXV 1995 Conference, 395 - 400.
- [4] E. Villascusa, *Global Extraction Sequences in Sublevel Stopping*, MPES 2003 Conference, Kalgoorlie, Australia.