

# Espaciamiento óptimo de niveles y chimeneas en la explotación minera subterránea

## Optimum spacing of levels and raises for the underground mining exploitation

Oswaldo Ortiz Sánchez<sup>1</sup>, Godelia Canchari Silverio<sup>1</sup>

RECIBIDO: 13/01/2016 - APROBADO: 30/06/2016

### RESUMEN

Se analizaron los diferentes factores que influyen en el espaciado de niveles y chimeneas. Algunos de estos factores comunes a todas las operaciones mineras que influyen en el espaciado de niveles son: Características del mineral y de la roca encajonante, condiciones económicas y la posibilidad de descubrir mineral en profundidad. Para el caso de chimeneas los factores de mayor influencia son las consideraciones geológicas, el método de minado y aspectos económicos.

Se consideró que variables específicas cuantificables más importantes son el mantenimiento de chutes entre niveles y chimeneas, cuyo costo se incrementa con el tiempo de uso y el volumen de material que pasa por ellos o sea el espaciado y también la eficiencia y seguridad traducido en costo incremental con el espaciado.

Combinando variables se obtuvo dos gráficos que muestran el espaciado de niveles vs. costo incremental por tonelada de mineral en mantenimiento de chutes y espaciado de niveles vs. costo incremental por pérdida de eficiencia y seguridad.

Esta información más otros costos permitió obtener un gráfico que nos da el espaciado óptimo para el costo mínimo de desarrollo de niveles. Similarmente se generó el espaciado entre chimeneas vs. el costo por tonelada de mineral extraído. El espaciado óptimo corresponde al costo mínimo unitario en la curva correspondiente.

**Palabras clave:** Nivel, chimenea, espaciado, costo de mina, método de minado.

### ABSTRACT

This study analyzes different factors which influence level and raise spacing. Some of these factors for levels common to all underground mining operations, are: Characteristics of ore and country rock, economic considerations and the feasibility of finding ore at depth. Factors of major influence for raise spacing are: Geologic conditions, mining system and economic aspects.

It was found that important specific quantifiable variables on level and raise spacing are ore pass maintenance, efficiency and safety. Ore pass maintenance increases with time of use and volume of material handled. Efficiency and safety change (increases in cost) with increasing level and raise spacing.

Combining variables two graphs were obtained: Level spacing vs. incremental mining cost due to ore pass maintenance and Level spacing vs. incremental cost due to loss in efficiency and safety.

This information in addition to other costs allowed us to generate an abacus of development cost of mining vs. level spacing which can be used for finding optimum level spacing at minimum cost. Same reasoning was applied for raises to obtain optimum raise spacing at minimum mining cost.

**Keywords:** Level, raise, spacing, mining cost, mining system.

<sup>1</sup> Docente EAPIM-Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: osoos1990@gmail.com

**I. INTRODUCCIÓN**

Los espaciamientos entre niveles y chimeneas en una operación minera, por su propia naturaleza, van a influenciar en los costos unitarios de extracción del mineral. El espaciamiento impropio de niveles y chimeneas es un factor que incrementa los costos de producción y poco o nada se puede hacer para modificar y reducirlos después que los intervalos de espaciamiento se hayan elegido.

Con frecuencia el espaciamiento entre niveles se elige por costumbre 30 metros o un múltiplo de él, como es el caso de las operaciones de la mediana y pequeña minería. En general no se considera ninguna condición o ley que gobierne la selección del intervalo más económico aunque en la práctica se tiende a un mayor intervalo posible.

**1.1. Objetivo del estudio**

Seleccionar el espaciamiento o intervalo más deseable entre niveles para producir mineral al más bajo costo por tonelada extraída dentro del más alto margen de seguridad y eficiencia para los trabajadores y el equipo; más aún se debe conseguir una máxima recuperación del mineral, considerando además que ningún método de minado subterráneo es capaz de recuperar el 100% de las reservas geológicas.

En el caso de chimeneas la elección óptima de espaciamiento es aquella que rinde la máxima recuperación del mineral al más bajo costo, de los tajos comprendidos entre chimeneas.

**1.2. Justificación del estudio**

Elegir el espaciamiento entre niveles y chimeneas en la explotación minera subterránea es una necesidad en todo plan de cualquier método de minado subterráneo. Actualmente esto se efectúa por tradición y no se le da importancia. No se usa fundamentos técnicos y económicos y no se considera la seguridad y eficiencia de la operación. Por tal motivo, el desarrollo de un sistema para elegir espaciamiento de niveles y chimeneas contribuirá a mejorar el planeamiento de mina, la reducción de los costos de minado, el incremento de la seguridad y la eficiencia operativa en interior mina.

Un país minero como el nuestro debe generar tecnología minera y este es un tema que contribuirá a este fin alertando al operador minero a prestarle atención especialmente en los nuevos proyectos mineros subterráneos

**II. MATERIALES Y MÉTODOS**

**2.1. Condiciones generales**

La recuperación de valores minerales en profundidad requiere el establecimiento de niveles y chimeneas para una racional, segura y eficiente administración del sistema de minado. Pero en la elección de estos espaciamientos interviene un gran número de variables que hace complejo el análisis. Entre los factores de mayor influencia podemos

mencionar: Distribución vertical de los minerales, fracturamiento y fallamiento del mineral y roca encajonante, dureza de la roca, tamaño del equipo, nivel o velocidad de explotación, seguridad, eficiencia de la operación y costo unitario.

**2.2. Discusión del problema**

El espaciamiento óptimo de niveles puede lograrse tanto en la minería superficial como en la subterránea. En la explotación superficial los niveles generalmente tienen alturas menores. Estas alturas oscilan entre 5 y 18 m (Boky B., 1967), y se rigen por el tamaño del equipo de carguío y acarreo empleado, la granulometría del material, la seguridad, el costo y en parte la recuperación de los valores. Las Figs. N.º 1 y 2 presentan estos arreglos típicos (Pfleider, E.P. 1968). En la minería subterránea además del costo mínimo prima la seguridad y la eficiencia de la operación y los espaciamientos son varias veces mayores que en la minería superficial. La Fig. N.º 3 muestra este espaciamiento clásico (Peele, R., 1941).

El método a seguir en este estudio es el de observación en el campo especialmente para deducir la relación entre costo y seguridad, y entre costo y eficiencia. Se debe traducir esta información en términos determinísticos y expresarlos como componente del costo para diferentes espaciamientos de niveles y chimeneas trazando curvas de costo total vs. espaciamiento. El espaciamiento elegido tanto en niveles como en chimeneas será el que rinda el menor costo por tonelada de mineral recuperado.



Figura N.º 1. Tajo a C.A. mostrando sus niveles



Figura N.º 2. Dos alturas de banco (nivel) en tajo a C.A.

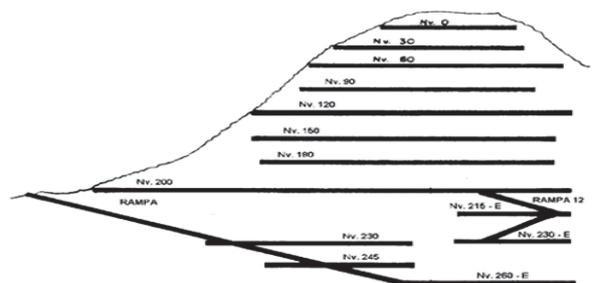


Figura N.º 3. Niveles en una operación minera subterránea

### 2.3. Formulación del problema

Un requerimiento básico en toda operación minera es extraer mineral de cualquier profundidad al más bajo costo siguiendo las normas de seguridad y eficiencia. El espaciamiento de niveles y chimeneas es una de estas variables importantes que incrementan o disminuyen el costo de minado. No obstante, como estas labores son de larga duración (varios años), sus efectos sobre el costo no son detectados con facilidad.

### 2.4. Factores que influyen el espaciamiento de niveles y chimeneas

En general las variables importantes en el espaciamiento de niveles y chimeneas pueden agruparse en tres categorías comunes a todas las operaciones mineras: a) Posibilidad de descubrir mineral en profundidad, b) Características del mineral y de la roca encajonante y c) Condiciones económicas.

#### 2.4.1. Posibilidad de mineralización económica en profundidad

Para elegir espaciamiento de niveles debe predecirse con certeza razonable la continuidad de la mineralización en profundidad para lo cual antes de poner en marcha los planes de desarrollo no solo debe prospectarse con perforación de profundidad (tipo diamantina o percusiva), sino que también debe recopilarse y estudiar todos los datos geológicos relativos al comportamiento del cuerpo mineralizado en profundidad sin tener en cuenta si es del tipo filoniano o de reemplazamiento. Este comportamiento tiene influencia en el mayor o menor espaciamiento de niveles.

#### 2.4.2. Características del mineral y de la roca encajonante

La estructura y dureza del cuerpo mineral y de la roca encajonante determinan el método de minado que a su vez afecta la elección del espaciamiento de niveles. Si el mineral y la roca encajonante son resistentes y firmes no necesitan sostenimiento por largos tramos por lo que los niveles pueden espaciarse a grandes distancias. Sin embargo, si el mineral es abrasivo y causa destrucción de las vías de transferencia (chutes), inutilizándolos antes de que el tajo sea minado completamente, los costos de reparación y mantenimiento de estos pasajes pueden exceder los ahorros generados al elegir un espaciamiento mayor entre niveles. Adicionalmente, si el mineral es de alta ley y errático se requerirá menor intervalo de niveles para minimizar dilución y no perder valores.

#### 2.4.3. Condiciones económicas

Sobre esta variable tienen influencia los siguientes factores:

- a). Tiempo de desarrollo de labores. Es importante sobre todo en operaciones mineras pequeñas porque el concesionario minero tiene por lo general capital li-

mitado y debe comenzar la producción rápidamente. Presiones económicas pueden obligar la apertura de otro nivel de producción a una profundidad bastante cercana del primer nivel. En este caso, esta variable es de mayor influencia en el espaciamiento.

- b) Vida y mantenimiento de un nivel. En terreno inestable y difícil un nivel puede permanecer abierto durante un año o menos después de lo cual los costos de mantenimiento para conservarlo abierto pueden incrementarse grandemente. Esta condición justificaría menor intervalo de niveles de modo que permita rápida recuperación del mineral encima de cualquier nivel antes de que los costos de mantenimiento aumenten.
- c) Costo de equipo en cada nivel. Si un nivel debe producir un elevado tonelaje diario debe usarse equipo grande de transporte y por lo tanto mayor espaciamiento de niveles. En minas pequeñas donde se produce por ejemplo 50 ton/día, el equipo requerido será de tamaño pequeño con menor número de unidades por nivel.
- d) Costos de desarrollo. Los componentes de este costo que influyen en el espaciamiento de niveles son: Costos de estaciones, equipamiento, corrida de galerías, cortadas y chimeneas. Después de equipado una galería o crucero en forma apropiada incluyendo el personal, los costos de avances son casi constantes por lo que el costo unitario de una galería o cortada deben ser relativamente constantes a cualquier espaciamiento entre niveles. Casos eventuales como fallas, terreno muy difícil y otras condiciones no usuales que requieren solución especial, pueden influenciar notablemente en la variación de los costos a diferentes espaciamientos. Los costos de chimeneas varían de acuerdo a la longitud (a mayor longitud mayor costo). Comparado con una galería, una chimenea es generalmente más costosa por unidad de avance. Desde su inicio el costo mayor se debe a los gastos de preparación, movilización, protección del nivel, eliminación del desmonte, etc. Adicionalmente, los records muestran que los costos por metro de avance de chimeneas se incrementan después de los primeros 30 a 33 metros.
- e) Costos directos de minado. En gran parte están influenciados por el espaciamiento entre niveles. Como regla, a mayor espaciamiento de niveles menor rendimiento de los trabajadores en los tajos, a menos que las vías de acceso y suministro sean apropiadas. Además, las reparaciones de los chutes de mineral requieren tiempo y gastos elevados. A menudo estos costos son difíciles de estimar en especial si el operador minero no ha tenido experiencia con chutes de gran longitud y sus costos de mantenimiento.
- f) Recuperación del mineral. Puede también depender del espaciamiento entre niveles en especial si los niveles se encuentran tan espaciados que los derrumbes comienzan a ocurrir en los tajeos antes de concluir con el minado perdiéndose parte del mineral. Si se decide recuperar todo el mineral deberá "pasarse" el derrumbe lo que incrementará el costo de minado. Si en el sistema de minado se dejan pilares como

sostenimiento y se decidiera recuperarlos, la facilidad de recuperación se verá afectada por el mayor espaciamiento de los niveles.

- g) Buzamiento del cuerpo mineralizado. En inclinaciones medias ( $15^\circ$  a  $45^\circ$ ), el mineral necesita palaneo por lo que sería más conveniente un intervalo pequeño entre niveles. En inclinaciones mayores el mineral cae por gravedad disminuyendo el costo de extracción (Cummins A. B. y otro, 1973).
- h) Seguridad de las operaciones y reacción de los trabajadores ante el peligro en el minado. Los trabajadores necesitan desempeñarse con la mayor tranquilidad. La seguridad no se relaciona directamente con el espaciamiento entre niveles pero se ha encontrado que trabajadores cansados son más propensos a accidentes que aquellos recién ingresados a la labor. La subida de chimeneas largas a los lugares de trabajo es cansada y desmoralizadora para la mayoría de los trabajadores. Excepto en casos no comunes, la eficiencia del trabajo disminuye en lugares aislados a los cuales se llega después de larga caminata ascendente. La supervisión es también menos efectiva en estos puntos de trabajo resultando finalmente en un elevado costo de producción.
- i) Velocidad del tajeado y comportamiento del subsuelo. Son factores relacionados. El intervalo entre niveles debería ser tal que los tajos se concluyan en el tiempo que puedan permanecer abiertos sin costo elevado de mantenimiento.
- j) Método de minado. Los sistemas de minado tienen influencia directa en los espaciamientos de niveles y chimeneas. Así por ejemplo en los métodos de reducción (shrinkage) y de subniveles, el primero aplicado a cuerpos mineralizados medianos y pequeños (Fig. N.º 4), y el segundo a cuerpos masivos y de gran tamaño (Fig N.º 5).

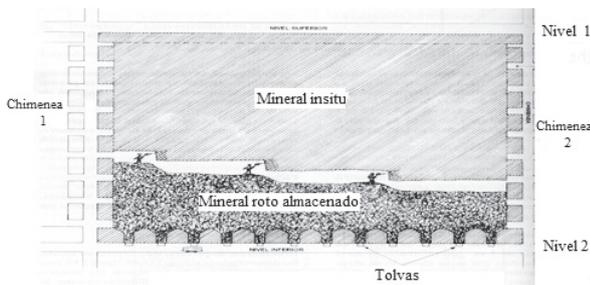


Figura N.º 4. Ubicación de niveles en el método de shrinkage convencional. Minado subterráneo.

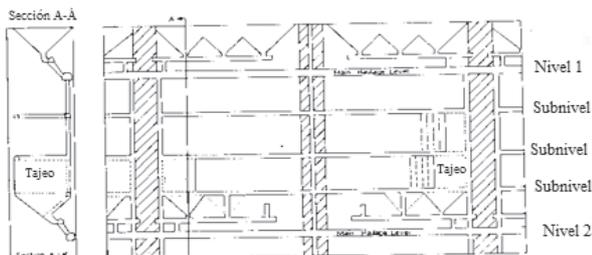


Figura N.º 5. Ubicación de niveles en el método de minado subterráneo por subniveles.

En el método de reducción el espaciamiento de niveles será menor considerando la secuencia de minado. En el método de subniveles el espaciamiento de niveles será mayor porque la extracción por taladros requiere subniveles para posicionar la perforación de taladros largos sobre veta.

## 2.5. Selección del intervalo óptimo entre niveles

El problema de considerar todos los factores cuando se está estudiando el intervalo más conveniente entre niveles es complejo pero podemos simplificar el análisis desglosando los factores en series de problemas simples. Dividiendo el problema complejo en sus partes componentes más simples es posible deducir una respuesta aceptable. Cada proyecto u operación minera presenta un caso especial para el intervalo apropiado de niveles, siendo materia de experimentación. Los niveles profundos son generalmente de mayor espaciamiento que los superiores pues en estos niveles la exploración fue intensa y se tiene buen conocimiento de la geología como para correlacionar en profundidad (Fig. N.º 3).

Para demostrar la metodología se usará datos de la veta Pique de la mina Magistral para lo cual se da la siguiente información:

### 2.5.1. Características del yacimiento mineral

Ancho promedio: 1 m.

Sistema de minado: Corte y relleno

Mineralización: Constante

Longitud explorada: 210 m.

Profundidad explorada: 200 m. desde superficie

Buzamiento;  $75^\circ$  SE

Peso específico mineral in situ: 3.00

Velocidad de explotación: 70 tm./día

Galerías y cruceros, longitud por nivel: 390 m.

Chimeneas requeridas: 5

Los desarrollos son rápidos y se hallan suficientemente adelantados tal que permiten un espaciamiento apropiado. En cada nivel existirá el mismo tipo de equipo.

### 2.5.2. Estimación de costos

Estos fueron obtenidos en la operación minera Magistral.

a) Costo de operación por ton.m.

Minado \$14.10

Concentración 12.65

Transporte 2.65

Leyes sociales 5.00

Oficina Lima 6.75

Depreciación Instalaciones 0.85

Gastos generales 7.40

Costo total/t.m. \$ 49.40

b) Costos de Desarrollo:

Profundización pique N.º 1 \$ 820/metro

Galerías \$ 270/metro

Chimeneas: Hasta 30 m. \$ 210/metro

30 a 60 m \$ 235/metro

60 a 90 m \$ 270/metro

c) Estación Pique N.º 1

Castillo \$ 6,500

Winche y motor \$ 18,500

Jaula y accesorios \$ 1,950

Cable Ext. Plow Steel 5/8" \$ 1,700

Tolva \$ 3,000

Costo total \$ 31,650

d) Costo equipo por nivel.

Considerando que la velocidad de minado es baja no se requerirá mayor mecanización.

- Carguío

Una pala mecánica + motor 14 HP \$ 6,500

- Transporte interior

Una locomotora de bat. 1.8 TC \$ 12,000 con motor de 12 HP 9 carros de 2000 lbs \$ 11,000

- Aire comprimido

1000 pies tuberías de 6"  $\varnothing$  \$ 6,000

1200 pies tuberías de 4"  $\varnothing$  \$ 5,500

- Perforación

4 perforadoras Atlas \$ 13,000

3 perforadoras Stoper \$ 10,000

7 mangueras de aire \$ 1,600

7 mangueras de agua \$ 1,000

10 juegos de barrenos de 1"  $\varnothing$  \$ 2,200

- Ventilación

1 ventiladora de 5,000 cfm. \$ 4,000

Tuberías de lona \$ 1,100

Motor eléctrico de 15 HP \$ 1,200

Costo total \$ 75,100

e) Izaje (transporte vertical)

Supervisión y labor \$ 3.30

Materiales, mantenimiento general

\$ 0.40

Izado \$ 0.50

Jaulas y cables \$ 0.25

Pique \$ 0.15

Fuerza \$ 0.15

Talleres \$ 0.75

Servicios \$ 0.05

Costo total \$ 2.70

f) Sostenimiento

Materiales: Madera (pie<sup>3</sup>) \$ 6.60

Transporte a Mina \$ 0.50

Recargos \$ 0.60

Costo total en mina \$ 7.70

Colocación, Supervisión

y labor por cuadro \$ 9.40

g) Buzones

Materiales: Madera en mina pie<sup>3</sup> \$ 7.80

Pies cúbicos por buzón: 192

De lo anterior se tiene:

Costo directo de profundización pique

\$ 820/m

Costo de la corrida de galería (nivel)

\$ 270/ m

Costo de chimeneas: Hasta 30 m. \$ 210/m.

30 a 60 m \$ 235/m.

60 a 90 m \$ 270/m

Costo de la Estación Lumbera + tolvas

\$ 31,650

Costo de equipo por nivel \$ 37,320

Costos variables dependiente de factores diferentes:

Reparación de niveles:

hasta 1 año de servicios \$ 200/día

de 1 a 2 años \$ 250 "

de 2 a 3 años \$ 300 "

Mantenimiento de niveles: Se obtendrá del gráfico de la Fig. N.º 5

Seguridad y pérdida de eficiencia: Se obtendrá del gráfico de la Fig. N.º 6.

Mineral a extraer por metro de profundidad: 1.0 x 1 x 210 x 3 = 630 ton. métricas (sobre veta).

Los cálculos que se efectúan a continuación tienen las siguientes limitaciones:

a) Se asume que solo el 85 % del mineral es recuperado (factor de seguridad)

b) El análisis no incluye costos directos de minado. Solo los mostrados en las Figs. N.ºs 6 y 7 y que depen-

den del espaciamiento entre niveles. La influencia estimada del costo de mantenimiento de orepasses se resume en la relación siguiente de las variables espaciamiento de niveles (X) m. vs. incremento del costo de mantenimiento de orepasses (Y) \$:

X: 30 40 50 60 70 75

Y: 0.00 0.50 0.75 1.30 2.40 2.90

La influencia estimada de la seguridad y eficiencia (Y \$), en el espaciamiento de niveles (X) m se resume en la relación siguiente de las variables X vs. Y:

Y: 0.00 1.80 3.20 3.95 9.40

X: 30 45 60 75 90

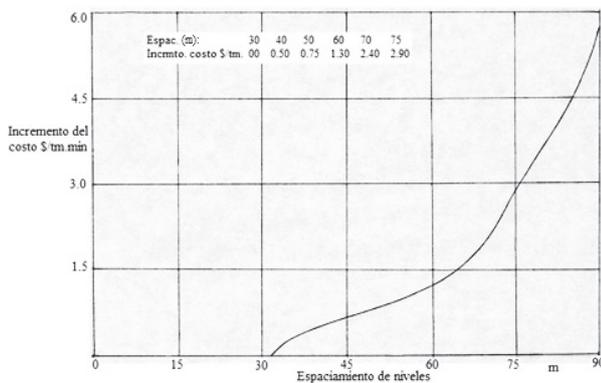


Figura N.º 6. Espaciamiento de niveles vs. Mantenimiento de chutes

Las funciones que generan estos datos se analizaron por el método numérico de diferencias divididas (Nieves, H.A. y otro, 2012, p. 374).

- c) La vida del nivel se calcula a la velocidad de explotación de 70 tm/día, sin embargo es posible que este tonelaje no se alcance al inicio de la explotación.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Espaciamientos de niveles

En la mayoría de las operaciones mineras nacionales se ha registrado un espaciamiento mínimo de 30 m. dejando los espaciamientos menores para casos extremos de tipo económico o de seguridad y en operaciones muy pequeñas. Estos espaciamientos son: 10, 15, 20 y 25 m. para los cuales no se tiene datos pero se concluye que se aplican en casos de operaciones muy pequeñas cuando el operador minero no tiene recursos económicos y para casos extremos de riesgo en terrenos sumamente inestables si se descarta el sistema superficial que puede garantizar seguridad al personal y al equipo.

#### 3.2. Variables y costos

Para espaciamientos mayores a 30 m. se

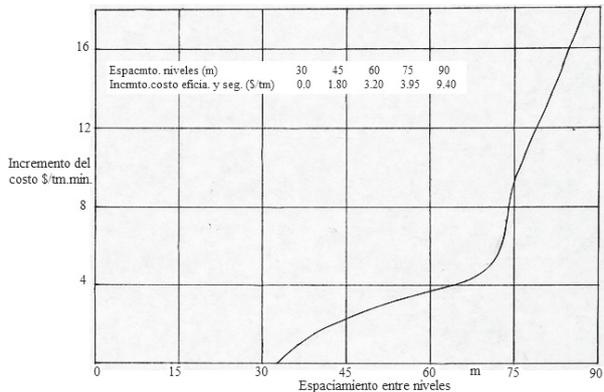


Figura N.º 7. Espaciamiento entre niveles vs. Eficiencia y Seguridad

consideró las siguientes variables influyentes: Seguridad de la operación, eficiencia, costo de mantenimiento de chutes, costo de equipo por nivel, costo de profundización del pique que varía con la profundidad donde a mayor profundidad mayor costo, costo de la corrida de galerías y cortadas en US \$/m. de avance. Este costo también va a variar con la longitud preparada.

Los espaciamientos analizados son 30, 45, 60, 75 y 90 m. Eventualmente se ha considerado 40, 50 y 70 m.

Se comenzará con un espaciamiento de 30 m ya que se ha observado que hasta este límite las curvas N.ºs 6 y 7 no presentan costo adicional.

#### 3.2.1. Espaciamiento 30 m

Recuperación mineral de veta: 630 m x 30.

Cosec 75° x 0.85 = 16,600 tm.

Gastos de desarrollo:

Estación pique: \$ 31,650 Desarrollo del Nivel 270 \$/m x 390 =

\$ 105,300

Chimeneas 5 x 210 \$/m x 30 m = \$ 31,500

Costos de reparación:

Vida estimada: 630 ton/m x 30 m /70

ton/día = 270 días

Costo de reparación 270 x 200 = \$ 54,000

Costo de mantenimiento de chutes (Fig.

N.º4)

0

Costo de pérdida de eficiencia (Fig. N.º 5)  
 0  
 Costo de equipo por nivel \$ 75,100  
 Costo de profundización de pique \$ 24,600  
 Total \$ 322,150  
 Por lo tanto: Costo total de desarrollo para 30 m de intervalo: \$ 322,150/16,600 = \$ 19.40/tm. de mineral

**3.2.2. Espaciamiento 45 m**

Mineral recuperable: 630 x 45 x cosec.  
 $75^\circ \times 0.85 = 24,900$  tm.  
 Costos de desarrollo:  
 Estación pique \$ 31,650  
 Corrida del nivel (\$ 270 x 390 m) = \$ 105,300  
 Chimeneas (5 x \$ 225 x 45 m) \$ 50,625  
 Reparación:  
 Vida estimada (630 x 45)/70 = 405 días  
 $405 \times \$ 220 = \$ 89,100$   
 Mantenimiento de chutes (Fig. N.º 6)  $0.5 \times 24,900 = \$ 12,450$   
 Pérdida de eficiencia (Fig. N.º 7)  $1.6 \times 24,900 = \$ 39,840$   
 Equipo por nivel \$ 75,100  
 Profundización de pique (820 x 45) = \$ 36,900  
 Costo total \$ 440,965  
 Costo total de desarrollo en 45 m de intervalo \$ 440,965/24900 = \$17.70/tm de mineral

**3.2.3. Espaciamientos mayores a 45 m**

Cálculos similares para intervalos entre niveles a 60, 75 y 90 m dan los siguientes resultados:  
 Intervalo entre niveles (m) Costo por ton.m. (\$)  
 30 19.40  
 45 17.70  
 60 17.80  
 70 24.30  
 90 33.10

**3.3. Discusión de resultados**

La Fig. N.º 8 muestra el trazo Costo de minado (\$/tm.) vs. Espaciamiento de niveles (m). donde vemos que el espaciamiento de 50 m. tiene un costo mínimo de \$ 17.50/ tm. En realidad, el costo mínimo varía muy poco entre los espaciamientos 40 y 55 m.

En los cálculos se han asumido valores para los costos de mantenimiento de chutes y eficiencia de trabajo. Los gráficos de las Fig. N.º 6 y 7 dan estos detalles. Para el trazado de estos gráficos se observó en el campo el costo unitario de minado vs. el espaciamiento de niveles en 3 operaciones de minado por corte y relleno ascendente, almacenamiento provisional y subniveles. Las curvas son aproximaciones y se tomó como base un espaciamiento mínimo de 30 metros entre niveles. Los pares de valores observados fueron los siguientes:

Para mantenimiento de chutes:  
 Espaciamient.(m) 30 40 50 60 70 90  
 Incremento 0.0 0.50 0.75 1.30 2.40 2.90  
 del costo \$/tm.



Figura N.º 8. Espaciamiento de niveles vs. Costo de Desarrollo de Niveles

Para eficiencia y seguridad:  
 Espaciamiento (m) 30 45 60 75 90  
 Incremento del 0.0 1.80 3.20 3.95 9.40  
 costo \$/tm.

Con estos datos se acomodaron 2 curvas por diferencias divididas,

Una curva corresponde al espaciamiento de niveles vs. mantenimiento de chutes (Fig. N.º 6). La segunda curva da el espaciamiento de niveles vs. eficiencia y seguridad (Fig. N.º 7).

**3.4. Criterios para el espaciamiento de chimeneas**

La elección del espaciamiento entre chimeneas se basa en la máxima recuperación del mineral de los tajos comprendidos entre chimeneas.

**3.5. Factores que inciden en el análisis**

Las variables que tienen gran influencia en el espaciamiento de chimeneas son: Consideraciones geológicas, método de minado y aspectos económicos.

**3.5.1. Consideraciones geológicas**

El aspecto geológico se refiere a la distribución horizontal de los valores minerales, el grado de fracturamiento del macizo rocoso y el tipo de yacimiento como diseminado, tabular, veta, inclinación y competencia.

**3.5.2. Método de minado**

El método de minado se relaciona con el tipo y tamaño del equipo, la velocidad de extracción y la seguridad.

**3.5.3. Consideraciones económicas**

Factores económicos se consideran los siguientes: Tiempo requerido para preparar y explotar el tajo, longitud y eficacia del rastrillaje, mantenimiento de chutes y otros costos por pérdida de eficiencia debido al incremento de la longitud de los tajos.

**3.6. Determinación del espaciamiento de chimeneas**

El procedimiento de cálculo de inicio del espaciamiento óptimo de niveles: 50 m. y con los datos dados para el espaciamiento de niveles se procede a estimar los costos para intervalos tales como: 7.50 m, 15 m., 22.50 m, etc.

**3.6.1. Tonelajes y costos**

Mineral por metro de longitud horizontal:

$$1.0 \times 1.0 \times 50 \times 3 = 150 \text{ tm.}$$

Costo de corrida de chimenea  $225 \times 50 = \$ 11,250$

Los costos (\$/tm.min.) para diferentes intervalos de chimeneas fueron estimados del modo siguiente:

Costo de desarrollo de chimenea (\$)/tm. mineral extraídos al espaciamiento analizado:

Para 7.5 m de espaciamiento:

$$\$11,250 / (7.5 \times 150) = \$ 10.0 / \text{tm}$$

Para 15.0 m de espaciamiento:

$$\$ 11,250 / (15.0 \times 150) = \$ 5.0 / \text{tm}$$

Cálculos similares para diferentes intervalos se resume a continuación:

Espaciamiento (m) Costo \$/tm.min.

7.5 10.0

15.0 5.0

22.5 3.3

30.0 2.5

37.5 2.0

45.0 1.7

**3.6.2. Discusión de resultados**

Condicionamientos:

- Las variables económicas deben estimarse razonablemente.
- El minado es en un solo sentido siguiendo el rumbo del yacimiento a partir de la chimenea.

La Fig. N.º 9 presenta la curva Espaciamiento de chimeneas vs. Costo de desarrollo. A esta curva debe agregarse otra sobre influencia (eficiencia), de cada variable en el costo de minado para cada intervalo de chimeneas. A mayor intervalo menor eficiencia y mayor costo. Se estima que la curva de eficiencia modela una parábola cuadrática al inicio ( $x = k y^2$ ) y luego se acelera incrementándose el costo a mayor velocidad y cambiando a una curva parabólica cúbica ( $x = k y^3$ ) para espaciamientos superiores a 40 m. (curva con línea de segmentos). Las dos curvas se agregan en una curva suma (curva con línea de puntos), obteniendo un espaciamiento óptimo entre 20 y 30 m. a un costo incremental de \$4.8/tm.

Si el minado se efectuara en ambas direcciones en lugar de una dirección, el intervalo puede duplicarse a 40 m. La extracción en ambas direcciones puede disminuir los costos de desarrollo aunque la corrida de la chimenea puede ser más costosa si se necesitara chutes intermedios. En este análisis solo se considera un solo sentido de minado.

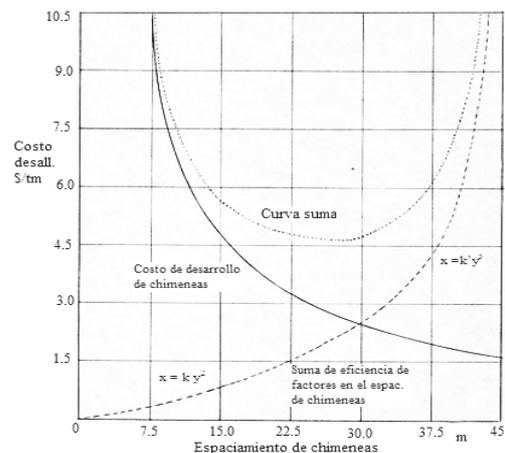


Figura N.º 9. Espaciamiento de Chimeneas vs. Costo Minado

**IV. CONCLUSIONES**

1. El correcto intervalo entre niveles y chimeneas puede disminuir los costos por metro desarrollado.
2. Como los costos de desarrollo de niveles y chimeneas pueden ser muy elevados en el orden de 12 % sobre los costos totales de minado, se debe estudiar detenidamente cuando se planea profundizar la mina con miras a ubicar un nuevo nivel.

3. Se ha considerado como variables generales influyentes en el espaciamiento de niveles al costo de mantenimiento de chutes y a la eficiencia y seguridad por ser variables que pueden cuantificarse expresándolos en términos monetarios. Otras variables que van a influir en estos espaciamientos son la competencia del terreno, la distribución de valores metálicos, la recuperación del mineral y el método de minado. Todas estas variables se aplican en forma individual a cada yacimiento y se debe analizar por separado.
4. Existe un límite económico en el espaciamiento de niveles y chimeneas que da la máxima recuperación al más bajo costo. Este intervalo es variable de un yacimiento a otro dependiendo de factores geológicos, factores económicos y características del mineral y de la roca encajonante.

#### V. AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM.

#### VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cummins, A.B. & Given, I.A., (1973). Mining Engineering Handbook. v.1, section 12. Underground mining systems and equipment, p. 12. SME. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., New York, N. Y., USA.
2. Mining, B. B. (1967). *Mining work and mining machinery*. pp: 334-338. Translated from Russian by John Scott, Mir Publications.
3. Nieves, H. A. y Domínguez, S. F.C.(2012). *Métodos numéricos aplicados a la Ingeniería*. Grupo Editorial Patria, México. pp: 373-377.
4. Peele, R. (1941). Mining Engineering Handbook v. 1, pp: 1060 – 1084. John Wiley & Sons, New York, N.Y., USA.
5. Pfleider, E. P. (1968). Planning and engineering design of open pits and quarries, pp: 161-164, AIMM-PE. Inc., New York, N.Y.

