



Conciencia Tecnológica

ISSN: 1405-5597

contec@mail.ita.mx

Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
México

Escamilla López, Miguel

Optimización de mezclas de minerales mediante programación lineal en una mina de mineral de hierro  
a cielo abierto

Conciencia Tecnológica, núm. 22, 2003

Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Aguascalientes, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402203>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS DE MINERALES MEDIANTE PROGRAMACIÓN LINEAL EN UNA MINA DE MINERAL DE FIERRO A CIELO ABIERTO

M.C. Miguel Escamilla López

Instituto Tecnológico de Colima / Departamento de Ingeniería Industrial  
Avenida Tecnológico No.1 Villa de Alvarez, Colima. Tel ( 312 ) 312 99 20 y 312 63 93 Ext. 243  
[melitc2003@hotmail.com](mailto:melitc2003@hotmail.com)

## RESUMEN

En el presente trabajo se muestra como se pueden aprovechar al máximo los minerales expuestos en las zonas de explotación, junto con los depositados en los patios y los terreros en una mina de mineral de Hierro a cielo abierto, efectuando mezclas eficientes mediante volúmenes de mineral para producir lotes diarios de concentrado determinados por medio de programación lineal, con el fin de optimizar el equipo de acarreo, cumplir con los programas de producción y reducir la variabilidad en las características químicas del concentrado.

## PALABRAS CLAVE

Hierro magnético, recuperación en peso, voladura, patio, terrero, zonas de explotación.

## INTRODUCCIÓN

Las mezclas de mineral son una actividad cotidiana y uno de los principales problemas en la industria minera; en la mayoría de los yacimientos existen minerales con diferente composición y características químicas, que la hace indispensable para alimentar a las plantas de beneficio mineral con calidad mas o menos uniforme y aprovechar las reservas al máximo <sup>[4]</sup>. El desarrollo de la computación y las técnicas matemáticas como la Investigación de Operaciones y mas específicamente la Programación Lineal, han venido a aminorar este problema <sup>[5]</sup>.

La gran variabilidad en las características químicas del mineral del yacimiento de una mina de mineral de Hierro a cielo abierto al norte del estado de Colima, genera la permanente mezcla de minerales con diversos contenidos de Hierro Magnético (FeM), Azufre (S), Sílice (SiO<sub>2</sub>) y Fósforo (P); sin embargo, el método utilizado hasta ahora es deficiente y tiene un enfoque correctivo, lo cual provoca alta variabilidad también en las características químicas del concentrado de mineral de Hierro <sup>[1]</sup>.

Por otra parte, se tiene un gran volumen de mineral fuera de especificaciones químicas que se encuentra depositado en 6 patios y 3 terreros, que son almacenes intermedios entre la mina y la quebradora

indispensables para efectuar las mezclas. Además, las zonas de explotación cada vez se encuentran mas distantes de la quebradora, generando ciclos de carga y acarreo con mayor duración que hacen improductivo el equipo de acarreo.

Los resultados obtenidos en la evaluación realizada, muestran que la programación lineal puede ayudar a reducir el ciclo promedio de carga y acarreo, cumplir con los programas de producción, aprovechar al máximo las reservas minerales y reducir la variabilidad en la calidad química del concentrado de mineral de Hierro.

## SITUACION ACTUAL

El mineral explotado es la Magnetita o mineral de Hierro, cuyo elemento metalúrgico básico es el Hierro Magnético (FeM) y determina su "Ley"; bajos contenidos de este no afectan la calidad del concentrado pero si afectan el volumen de producción; los contaminantes asociados son el Azufre (S), el Sílice (SiO<sub>2</sub>) y el Fósforo (P), que afectan al pelet de mineral de Hierro, al proceso en las acerías o bien, a la calidad del acero terminado y por lo tanto, es necesario mantenerlos bajo ciertos límites de especificación <sup>[3]</sup>.

El proceso de producción se divide básicamente en tres etapas, como lo muestra la figura 1 <sup>(2)</sup>; el logro de la calidad química del concentrado, garantiza la calidad química del pelet y determina en gran parte su calidad física; es decir, el cumplimiento de la calidad química del concentrado, garantiza el cumplimiento de la calidad química y física del pelet; de ahí su importancia <sup>[2]</sup>.

La alimentación del mineral a la quebradora se lleva a cabo por campañas; es decir, por voladuras completas, así las mezclas se efectúan en su totalidad en el almacén de mineral pero como su diseño es limitado, no permite efectuar estas mezclas ni con la oportunidad ni en el volumen demandados por el proceso de molienda y concentración, razón por la que una buena parte de estas debe hacerse con el apoyo de una flota de equipo móvil, compuesta por 2 cargadores CAT-988 y 4 camiones EUCLID R-50 <sup>[2]</sup>.

Figura 1. ETAPAS DEL PROCESO Y CARACTERIZACION DEL MINERAL

ETAPA DEL PROCESO	PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ESPECIFICACIONES
EXTRACCIÓN	MINERAL DE MINA FRAGMENTADO ( ROCAS ≤ 80 cm )	<b>FeM 30.0 % Mínimo</b> <b>S 0.30 % Máximo</b> <b>SiO<sub>2</sub> 2.30 % Máximo</b> <b>P 0.04 % Máximo</b>
MOLIENDA Y CONCENTRACIÓN	CONCENTRADO DE MINERAL DE FIERRO ( PULPA )	S 0.30 % Máximo SiO <sub>2</sub> 2.30 % Máximo P 0.04 % Máximo
PELETIZADO	PELET DE MINERAL DE FIERRO ( PEQUEÑAS PELOTAS )	S 0.15 % Máximo SiO <sub>2</sub> 2.30 % Máximo P 0.04 % Máximo

**Variabilidad en la calidad química del concentrado.** El método actual de mezclado, ocasiona que los valores de las características químicas (S, SiO<sub>2</sub> y P) del concentrado, continuamente estén fuera de sus límites de especificación, como se observa en la figura 2.

#### PROPUESTA DE INVESTIGACION

La propuesta de investigación, es un nuevo método de trabajo basado en un modelo de programación lineal, para efectuar las mezclas del mineral que es procesado en las plantas de beneficio al momento de alimentarlo a la quebradora, mediante la “alternancia de viajes” y manejado con base en volúmenes de mineral necesarios para producir lotes diarios de concentrado; de esta forma, el mineral llegará ya mezclado al almacén y ya no será necesario efectuar los movimientos con el equipo móvil en el almacén de mineral. Aunque se observa que el Fósforo no afecta la calidad del concentrado, será considerado en el método propuesto como medida de prevención.

#### OBJETIVO

Optimizar las mezclas de minerales con diferentes contenidos de Fierro Magnético ( FeM ), Azufre ( S ) y Sílice ( SiO<sub>2</sub> ) y Fósforo ( P ).

#### VARIABLES Y PARAMETROS DE CONTROL

Las variables a utilizar en la propuesta de investigación mediante programación lineal, son todas áreas donde se tenga mineral disponible :

**Las 3 zonas de explotación** (en este caso se utilizará el número de voladura correspondiente).

**Los 6 patios** que actualmente sirven como almacenes intermedios entre la mina y la quebradora (P7, P9, P12, P16, P20, P22).

**Los 3 terreros** en los cuales se tiene almacenado un gran volumen de mineral fuera de especificaciones (T1, T2, T4). Su unidad de medición es el número de viajes de mineral a alimentar a quebradora de cada fuente en camiones EUCLID R-120, (20 toneladas por viaje); ya que la propuesta es la alternancia de viajes al momento de la descarga del mineral en la quebradora.

Figura 2. VARIABILIDAD EN LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CONCENTRADO ( muestra que representa seis meses de operación )

CARACTERÍSTICA	MUESTRA ANALIZADA	VALORES FUERA DE ESPECIFICACIÓN	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	VARIANZA	AECTA LA CALIDAD
FeM	1,035	12	1.2 %	23.66033	NO
<b>S</b>	<b>1,035</b>	<b>216</b>	<b>20.9 %</b>	<b>0.00550</b>	<b>SI</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>1,035</b>	<b>349</b>	<b>33.7 %</b>	<b>0.05146</b>	<b>SI</b>
P	177	1	0.6 %	0.000025	NO

### Volumen de mineral a alimentar a quebradora.

Como se manejarán volúmenes de mineral necesarios para producir lotes diarios de concentrado, es indispensable saber cuanto volumen de concentrado se producirá a partir de cierto volumen de mineral, lo cual depende de su contenido de FeM; está dado por la siguiente ecuación<sup>[3]</sup>:

$$RP = -0.232735 + [ ( 1.45894 ) x ( FeM ) ]$$

Donde :

RP = Recuperación en peso del mineral en %

FeM = Contenido de FeM del mineral en %

### DISEÑO DEL MODELO

**Función objetivo.** Minimiza el tiempo total de alimentar a la quebradora el volumen de mineral necesario para producir un lote diario de concentrado

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n X_i T_i$$

**Restricción para el volumen de mineral a alimentar a quebradora.** La suma de los viajes de mineral de cada fuente a la quebradora, debe ser al menos igual al número de viajes de mineral necesarios para cumplir con un lote diario de producción de concentrado en camiones con capacidad para 120 toneladas (184 viajes) :

$$\sum_{i=1}^n X_i \geq 184$$

**Restricción para el lote diario de concentrado.** El concentrado a obtener de ese volumen de mineral ya descargado en la quebradora, debe ser igual a un lote diario de concentrado expresado en número de viajes ( 80 viajes ) :

$$\sum_{i=1}^n X \left[ \frac{(-0.232735 + ( 1.45894 x FeM_i ))}{100} \right] = 80$$

**Restricciones para las características químicas del lote de concentrado.** Los contenidos de Azufre, Sílice y Fósforo en la mezcla, deben ser iguales a sus especificaciones correspondientes ( 0.30%, 2.30% y 0.04% ) respectivamente :

$$\sum_{i=1}^n X_i \left[ \frac{CA_i \left[ \frac{(-0.232735 + ( 1.45894 x FeM_i ))}{100} \right]}{80} \right] = 0.30$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \left[ \frac{CS_i \left[ \frac{(-0.232735 + ( 1.45894 x FeM_i ))}{100} \right]}{80} \right] = 2.30$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \left[ \frac{CP_i \left[ \frac{(-0.232735 + ( 1.45894 x FeM_i ))}{100} \right]}{80} \right] = 0.04$$

**Restricciones de control adicionales.** Controlan volúmenes escasos de mineral en alguna fuente para que la solución final del modelo sea viable :

$$X_i \leq V_i$$

**Restricciones de no negatividad.** Los valores para las variables básicas en la solución final deben ser positivas :

$$X_i \geq 0$$

Donde :

$X_i$  = i-ésima fuente de mineral

$T_i$  = Ciclo de carga y acarreo de la i-ésima fuente

$FeM_i$  = Fierro Magnético del mineral de la i-ésima fuente

$CA_i$  = Azufre del mineral de la i-ésima fuente

$CS_i$  = Sílice del mineral de la i-ésima fuente

$V_i$  = Viajes de mineral en la i-ésima fuente

### RESULTADOS Y DISCUSION

**Evaluación.** El modelo fue evaluado mediante múltiples corridas con información real de entrada durante un periodo de 90 días utilizando el software QSB; los resultados fueron ajustados diariamente a los tiempos reales de operación, con el fin de compararlos contra los resultados reales; así mismo, se realizó una prueba a nivel piloto, simulando un duración de 3 días para evaluar el efecto en la calidad de las características químicas del concentrado.

**Duración promedio del ciclo de carga y acarreo.** La programación lineal permite alimentar un número mayor de viajes de mineral que con el método actual en un mismo lapso de tiempo, reduciendo en 4.9 minutos la duración del ciclo de carga y acarreo como se observa en la figura 3.

**Mineral alimentado a quebradora.** La menor duración del ciclo de carga y acarreo mediante programación lineal, permite un incremento sustancial en el volumen de mineral alimentado a quebradora en 3,647 toneladas por día para un cumplimiento del 99% del programa como se observa en la figura 4.

**Mineral de patios y terreros alimentado a quebradora.** Aquí es donde la programación lineal

alcanza mayor eficiencia, al lograr una alimentación de 10,039 toneladas por día, contra 2,763 toneladas sin utilizarla; ver la figura 5.

**Producción de concentrado.** También en este caso, la programación lineal puede ser eficiente al lograr un incremento de 142 toneladas por día, respecto a que si no se utilizara, como se observa en la figura 6.

**Características químicas en el concentrado.** Los resultados de la prueba a nivel piloto, muestran que el número de valores fuera de especificación no se reduce utilizando programación lineal, pero si es posible obtener una reducción significativa en la dispersión o varianza de los datos de 48% y 56% para el Azufre y el Sílice respectivamente como se observa en la figura 7.

Figura 3. DURACION PROMEDIO DEL CICLO DE CARGA Y

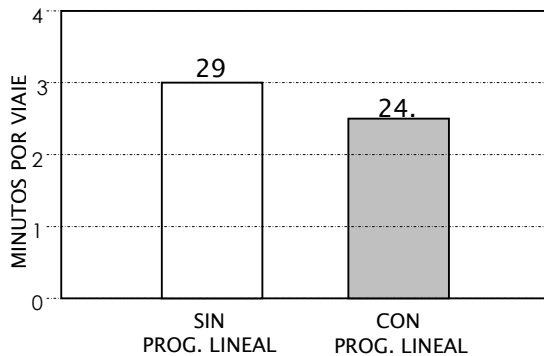


Figura 5. MINERAL DE PATIOS Y TERREROS

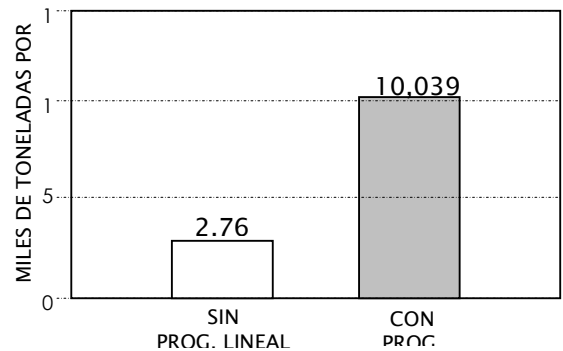


Figura 4. MINERAL ALIMENTADO A QUEBRADORA

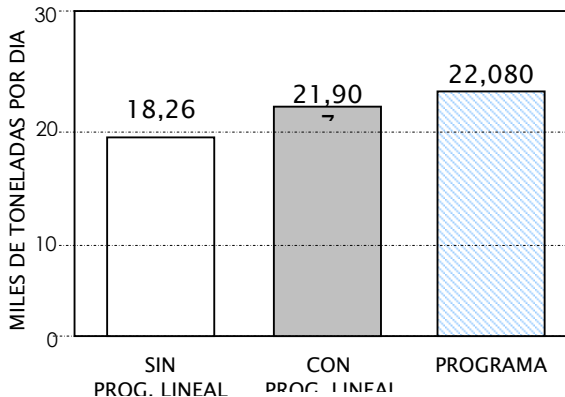


Figura 6. PRODUCCION DE

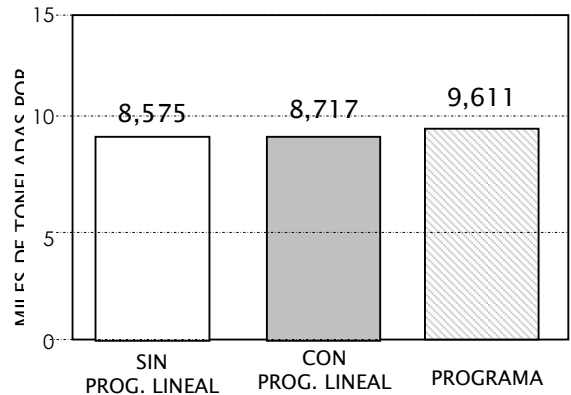


Figura 7. VARIABILIDAD EN LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS DEL CONCENTRADO

CARACTERÍSTICA	SIN PROG. LINEAL	CON PROG. LINEAL	REDUCCIÓN	
AZUFRE	0.0055	0.0029	0.0026	48 %
SÍLICE	0.0515	0.0229	0.0286	56 %

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la presente investigación, demuestran que el método propuesto para efectuar las mezclas de los minerales expuestos en las zonas de explotación y los depositados en los patios y los terreros utilizando programación lineal, puede ser mejor que el método utilizado actualmente, para reducir el ciclo promedio de carga y acarreo y cumplir los programas de producción establecidos.

Aunque el método propuesto no logra reducir el número de valores fuera de especificación de las características químicas Azufre y Sílice del concentrado, los resultados obtenidos en la prueba a nivel piloto muestran que puede ser eficiente para alimentar a la planta de beneficio mineral mas o menos de uniforme calidad y reducir con esto su rango de variabilidad, lo cual trae en consecuencia una calidad química en el concentrado y en el pelet mas uniforme y confiable.

Finalmente, es importante destacar que este método de trabajo apoyado en un modelo de programación lineal puede ser aplicado a cualquier mina de mineral de fierro del mundo; previa adecuación de las constantes operacionales incluidas en este; ya que las utilizadas son propias de la mina en la cual se realizó la presente investigación.

### BIBLIOGRAFIA

[1] Arreola, Risa Jesús S. (1997), *investigación de operaciones ( curso )*, c.m.b.j. “Peña Colorada”, S.A. de C.V., México, cap.2.

[2] Peña Colorada, C.M.B.J., (1993), *requerimientos para producir 3.0 y 3.5 millones de toneladas de pelets al año a partir de minerales con contenidos de fem < 37 %*, Peña Colorada, México.

[3] Peña Colorada, C. M. B. J. (1994), *process capacity analysis by equipments to produce 3.0 million of pellets tons per year*, Peña Colorada, México.

[4] Peralta, Romero Antonio, (1991), *analysis of the blending problem in open pit production scheduling (master of science thesis)*, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, cap.3.

[5] Peralta, Romero Antonio, (1998), *“Optimización de Mezclas de Minerales Utilizando Programación Matemática”* GEOMIMET No.213 Edición May./Jun., A.I.M.M.G.M., México.