

# Evaluación de Procesos en Concentración de Minerales con Ayuda de Diagramas de Eficiencia

**Dr. Ing. Antonio Salas Casado**

Docente Titular de Concentración de Minerales, Carrera de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad Técnica de Oruro  
salasdeviaje@yahoo.com

## Resumen

Es método corriente, tanto en la minería estatal como en la privada, evaluar un proceso de concentración de minerales mediante un balance metalúrgico registrando pesos y leyes de los diferentes productos y calculando, luego la recuperación. El método descrito permite conocer los resultados obtenidos, pero no muestra la perfección con la que se realizó el proceso y no permite obtener información sobre la concordancia entre los resultados obtenidos y la eficiencia con la que funciona la operación. Esta clase de información se logra construyendo los diagramas de eficiencia.

Con este artículo se pretende generalizar el uso de tales diagramas dando ejemplos de aplicación en las principales operaciones de concentración de minerales.

**Palabras clave:** Evaluación de procesos, concentración de minerales, diagramas eficiencia, diagramas Tromp, curvas Mayer, caracterización granulométrica, caracterización densimétrica de menas.

## Evaluation of processes in concentration of minerals with the help of efficiency's diagrams

### Abstract

It's common to evaluate a process of minerals concentration through a metallurgical balance, in the state mining and in the private mining, registering weights and laws of the different products and then calculating the recuperation. The method allows knowing the obtained results, but don't show the perfection of the process making, and don't allow obtaining information about the concordance between the obtained results and the efficiency of the operation. This class of information is achieved with the efficiency's diagrams.

With this article, is pretended to generalize the use of this kind of diagrams giving examples about the use of these in the main operations in concentration of minerals.

**Keywords:** Evaluation of processes, minerals' concentration, efficiency diagrams, Tromp diagrams, Mayer curves, granulometric characterization, densimetric characterization of ores.

## Avaliação dos processos em concentração de minerais com a ajuda de diagrama de eficiência

### Resumo

É um método comum, na mineração estatal e também na mineração privada, avaliar um processo de concentração de minerais através dum balanço metalúrgico, registrando os pesos e as leis dos diferentes produtos e calculando após a recuperação. O método descrito permite conhecer os resultados obtidos, mas não mostra a perfeição do processo e não permite obter informação sobre a concordância entre os resultados obtidos e a eficiência do funcionamento da operação. Esse tipo de informação só pode ser logrado construindo os diagramas de eficiência.

Neste artigo pretende-se generalizar o uso desses diagramas dando exemplos de aplicação nas principais operações de concentração de minerais.

**Palavras chave:** Avaliação de processos, concentração de minerais, diagramas de eficiência, diagramas Tromp, curvas Mayer, caracterização granulométrica, caracterização "densimétrica de menas".

### 1. Sistemas de Evaluación de Eficiencia en Concentración de Minerales

Los métodos más corrientes en la evaluación de eficiencia para procesos de concentración de minerales son los siguientes:

- a) Método de Tromp.
- b) Diagrama de Mayer.
- c) Sistemas matemáticos
- d) Métodos auxiliares

Para aplicar estos sistemas a un proceso a escala industrial o una prueba de laboratorio, es necesario realizar un muestreo sistemático y cuidadoso de los productos que se obtienen en el proceso; la alimentación por lo general no se muestrea y se la obtiene por la suma de los productos finales. Paralelamente se debe registrar el peso horario (si es planta industrial) o el peso total (si es prueba de laboratorio) de los productos obtenidos en el proceso de concentración.

Las muestras tomadas servirán para la construcción de los diagramas de eficiencia; para ello deben ser analizadas separadamente concentrados, intermedios y/o colas por la misma propiedad utilizada inicialmente, por ejemplo si se trata de una concentración magnética, se deben analizar las propiedades magnéticas de los productos obtenidos (fracciones magnéticas y no magnéticas); si se trata de una concentración por sink and flota, jigs, mesas, espiral Humprey, etc., se deben analizar los productos por sus propiedades gravimétricas (densidad o pesos específicos).

### 2. Método de Tromp

El diagrama de Tromp ha sido inicialmente muy utilizado para evaluar la concentración de carbón [2], posteriormente su uso se extendió a casi todos los sistemas de clasificación y concentración de minerales [3], [4], [5], [6], [7].

El método de construcción de este diagrama es simple y se explicará brevemente a través de la tabla 1, cuyos resultados se representan gráficamente en la figura 1.

Una separación o concentración ideal debe tener la forma de la curva No 1 en la figura 2; por el contrario si la operación es mala se obtienen curvas muy inclinadas o casi horizontales como la curva No 2 de la figura 2.

Las coordenadas del punto de la curva que dan un TZ = 50%, definen el parámetro de real clasificación o concentración; así por ejemplo en la figura 1; el TZ = 50% ocurre para un tamaño de grano de 0,79 mm, y significa que realmente se clasificó la carga con un corte de 0,79 mm, aunque la abertura de la tela fuese de 0,991 mm.

Este tipo de distorsión muestra una imperfección en el cribado que no se podía detectar por un balance metalúrgico.

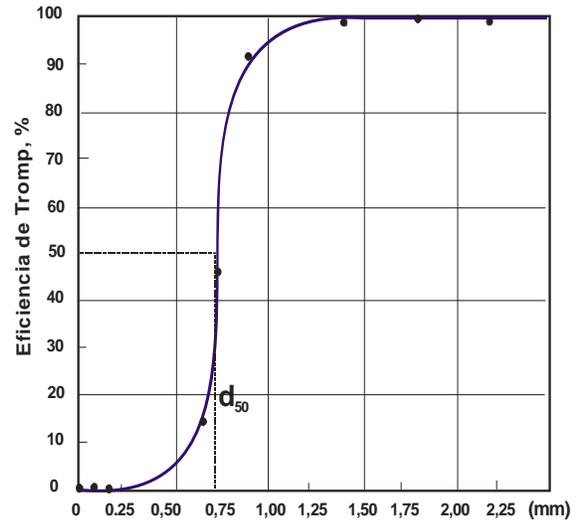


Figura 1. Clasificación en criba vibratoria, malla cuadrada de 0,991 mm, según [1].

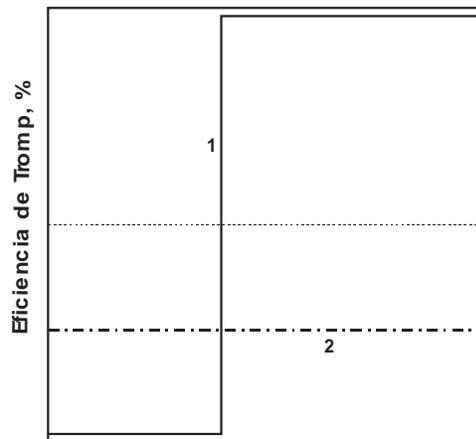


Figura 2. Curva 1, separación ideal; curva 2, simple cuarteo.

Del diagrama de eficiencia de Tromp se deducen los siguientes índices de perfección:

a) 
$$ET = \frac{d_{75} - d_{25}}{2}$$

ET = Eficiencia de Terra (o desviación de Terra)  
 d<sub>75</sub> = d cuando TZ = 75%  
 d<sub>25</sub> = d cuando TZ = 25%  
 ET tiende a 0 si el proceso es eficiente  
 ET es >> 0 si el sistema es imperfecto.

b) 
$$K = \frac{d_{75}}{d_{25}}$$

K = eficiencia K (ó índice Kappa de Eder)  
 K = 1 si el proceso es imperfecto  
 K > 1 si el proceso es imperfecto

Reimpresión del artículo publicado en la Revista Metalúrgica No 4, Junio de 1981; a pedido de los lectores. Revisado por el autor.

$$c) \quad I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2(d_{50} - 1)}$$

I = Imperfección

I = 0 el sistema es perfecto

I > 0 el sistema es imperfecto

Estos índices mantienen su valor indicativo si se los dibuja sobre el diagrama de Tromp original; sin embargo, si se construyen los diagramas de eficiencia de Tromp Reducida por un cambio de variable de las abscisas de  $y = \frac{x}{d_{50}}$  [8], es

preferible analizar las imperfecciones de la curva por el valor del índice  $M_T$  que es el momento de error de separación [9], [10], o por la pendiente de la curva en el  $d_{50}$ .

De acuerdo a la experiencia del profesor Trabinsky [11], experto en diseño y evaluación de ciclones, es recomendable utilizar sólo los diagramas originales de Tromp, si se desea tener información directa sobre las imperfecciones del proceso; los diagramas de Tromp Reducidos tienen utilidad tan sólo para la simulación matemática.

TABLA 1. Clasificación en criba vibratoria en tela de malla cuadrada Tyler # 16 (0,991 mm) [1].

Fracciones	Subtamaño			Sobretamaño			Alimentación			Eficiencia de Tromp
	Peso	% P.P.	% P.T.	Peso	% P.P.	% P.T.	Peso	% P.P.	% P.T.	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
2,36				82,60	15,6	5,51	82,60	5,51	5,51	100,00
-2,36 1,98				122,31	23,1	8,15	122,31	8,15	8,15	100,00
-1,98 1,65				101,65	19,2	6,78	101,65	6,78	6,78	100,00
-1,65 1,63				83,66	15,8	5,58	83,66	5,58	5,58	100,00
-1,63 0,99				74,67	14,1	4,98	74,67	4,98	4,98	100,00
-0,99 0,83	7,76	0,8	0,52	49,78	9,4	3,32	57,54	3,83	3,83	86,21
-0,83 0,70	140,72	14,5	9,38	11,13	2,1	0,74	151,85	10,12	10,12	7,33
-0,70 0,24	354,24	36,5	23,62	2,64	0,5	0,18	356,88	23,80	23,80	0,74
-0,24 0,10	270,77	27,9	18,05	1,06	0,2	0,06	271,83	18,12	18,12	0,39
-0,10	197,01	20,3	13,13	---	---	---	197,01	13,13	13,13	0,00
Suma	970,50	100,0	64,70	529,50	100,0	35,30	1.500,00	100,00	100,00	----

- (1) Fracciones granulométricas.
- (2) Peso de las fracciones en el subtamaño de la criba referido al peso horario (industrial) o al peso total (laboratorio).
- (3) % peso parcial tomando el subtamaño como 100%.
- (4) % peso total referido a la alimentación, a la vibradora.
- (5) Peso de las fracciones en el sobretamaño de la criba referido al tonelaje horario (industrial) o al peso total (laboratorio).
- (6) % peso parcial tomando el sobretamaño como 100%.
- (7) % peso total referido a la alimentación de la vibradora.
- (8) Peso de las fracciones en la alimentación, (8) = (2) + (5).
- (9) % peso del total de carga, (9) = (10).
- (10) Igual a (9), en el caso de la alimentación.
- (11) Eficiencia de Tromp:  $(11) = \frac{(5)}{(2)+(5)} \times 100$

O bien:  $(11) = \frac{(7)}{(4)+(7)} \times 100$

Diferencias que pueden ser debidas a las fracciones decimales.

En general, la eficiencia TZ se define:

$$TZ = \frac{\text{Peso del "concentrado" de la fracción } i}{\text{Peso de la alimentación de la fracción } i} \times 100$$

## 2.1. Aplicaciones del Diagrama de Tromp

Se han señalado ya las numerosas aplicaciones del diagrama de Tromp en concentración de minerales; sin embargo, pretendemos en este artículo demostrar que un simple

balance metalúrgico, no es suficiente para evaluar los resultados logrados con un determinado proceso y de esta manera generalizar el uso de diagramas de eficiencia entre los técnicos nacionales.

### 2.1.1. Diagrama de Tromp para Evaluar una Concentración en Jigs

Se ha concentrado una mena de plomo en un jig Denver y se han analizado los concentrados y las colas del mismo en líquidos pesados de diferentes densidades; paralelamente se ha efectuado un balance metalúrgico obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 2. Balance Metalúrgico de la concentración en jigs Denver de una mena de Pb, -1/4" a 20 #.

Producto	Peso, Kg	% peso	Ley de Pb %	Kg Finos de Pb	Recuperación Pb, %
Concentrado jig	900	18,00	40,20	361,80	92,77
Colas jig	4.100	82,00	0,69	28,20	7,23
Cabeza calculada	5.000	100,00	7,80	390,00	100,00
Cabeza ensayada			7,75		

El diagrama de Tromp para esta operación se representa en la figura 3, de donde se han calculado los siguientes índices de eficiencia:

$$ET = \frac{\rho_{75} - \rho_{25}}{2} = \frac{3,35 - 2,75}{2} = 0,30$$

$$K = \frac{\rho_{75}}{\rho_{25}} = \frac{3,35}{2,75} = 1,22$$

$$I = \frac{\rho_{75} - \rho_{25}}{2(\rho_{50} - 1)} = \frac{3,35 - 2,75}{2(3,15 - 1)} = 0,14$$

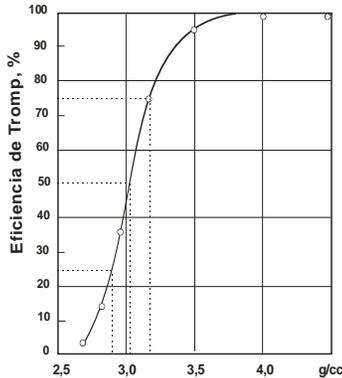


Figura 3. Diagrama de eficiencia para una concentración de galena en jig.

De los anteriores resultados, se deduce que:

- La recuperación de Pb en el concentrado es sumamente alta, por lo que podría considerarse que la operación es satisfactoria.
- El diagrama de Tromp muestra una concentración eficiente, ya que todos los índices de eficiencia están comprendidos dentro los límites favorables.
- La densidad de separación  $\rho_{50}$  es de 3,15 g/cc, y del estudio en líquidos pesados (figura 4), se verifica que los resultados del balance metalúrgico obtenido en jig, se aproximan a los ideales de una separación en líquidos pesados.

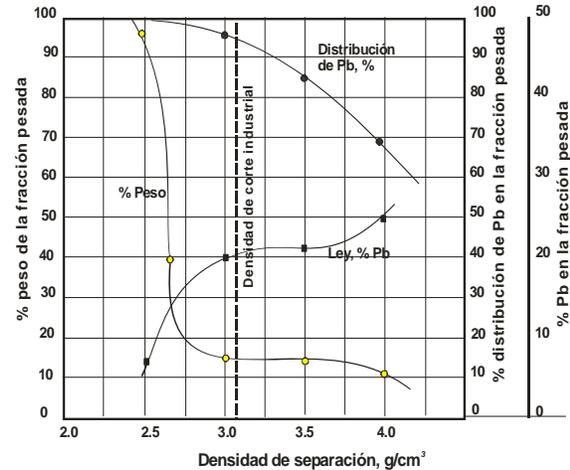


Figura 4. Análisis densimétrico de una mena de plomo para comparación de resultados posibles de obtener con los de una concentración real en jigs.

### 2.1.2. Diagrama de Tromp aplicable a la concentración en mesas

La construcción del diagrama de Tromp para evaluar una concentración gravimétrica requiere de la obtención de dos calidades de productos, y en las mesas se obtienen tres o más. En estos casos se puede construir un diagrama para la separación del concentrado del resto de la carga (segundas y colas), y diagramas adicionales para cada uno de los cortes que se operen en la mesa, pero considerando como si todos los productos a la derecha del punto de corte constituyen uno sólo, al igual que todos los que están a la izquierda.

El diagrama de Tromp en estos casos puede ser muy útil como se deduce de los resultados logrados con dos minerales diferentes de estaño que se denominarán A y B:

TABLA 3. Balance Metalúrgico de la concentración gravimétrica en mesa para dos menas de estaño, A y B.

	Mineral A			Mineral B		
	Peso % Total	% Sn Ley	Recup. Sn, %	Peso % Total	% Sn Ley	Recup. Sn, %
Concentrado	5,07	19,50	37,43	7,28	21,26	60,94
Cola	94,93	1,74	62,57	92,72	1,07	39,06
Cabeza calculada	100,00	2,64	100,00	100,00	2,54	100,00
Cabeza ensayada		2,65			2,55	

Los diagramas de eficiencia se representan en la figura 5, y los índices de eficiencia calculados son los siguientes:

Índice	Mineral A	Mineral B*
I	0,017	0,045
ET	0,015	0,13
K	1,01	1,09
$\rho_{50}$	2,865	2,895

\* Para el mineral B se tomó  $\rho_{60}$  y  $\rho_{40}$  porque la curva T no llega a 100%.

- De acuerdo a los balances metalúrgicos, el mineral A da una recuperación baja y podría suponerse, que es posible mejorar los resultados con un trabajo más cuidadoso, suponiendo que la granulometría y demás parámetros fueron bien regulados.
- La concentración del mineral B da una recuperación aceptable, y se podría pensar que difícilmente se lograría un mejor resultado a menos de que se retrate la carga. Se podría pensar que la carga fue convenientemente preparada para la prueba (granulometría, molienda, etc).

- El diagrama de Tromp para el mineral A muestra una aceptable eficiencia de operación con una densidad de clasificación  $\rho_{50} = 2,865 \text{ g/cc}$ , y la imperfección  $I = 0,017$  lo que significa que el proceso es eficiente desde el punto de vista de la separación de productos pesados y livianos, sin embargo el balance metalúrgico para la recuperación del estaño es desfavorable; éste resultado no es imputable al proceso, sino a las características de la mena que en las condiciones de la prueba no son adecuadas para ser tratada en mesas. Un estudio microscópico determinaría las razones para la baja recuperación.
- El diagrama de Tromp para el mineral B muestra que las partículas de peso específico mayores a 2,9 no se están concentrado, y simplemente se han repartido en aproximadamente 60% en el concentrado y 40% en la cola; lo que significaría que es posible mejorar la recuperación obtenida si se averigua porque estas partículas no se han concentrado. Las posibles causas son: carga mal clasificada, regulado inadecuado del golpe y amplitud, mal estado de rifles, graves deterioros en los diagramas de pulsación de las mesas, sobrecarga de las mesas, etc.

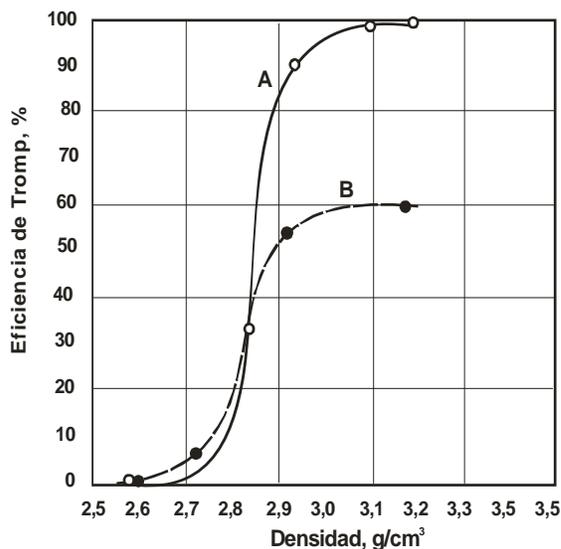


Figura 5. Diagrama de eficiencia para la concentración en mesas de dos menas de estaño.

La evidencia de que es posible mejorar los resultados con el mineral B se observa en la figura 6, donde se notará que a densidades de T.B.E. superiores a 2,8 se obtienen recuperaciones superiores a 80%.

Por lo que se deduce que aunque el balance metalúrgico lo calificaremos de “aceptable”, la información adicional del diagrama de Tromp y el estudio en T.B.E. demuestran que el mineral fue mal concentrado y que se pueden exigir mejores resultados.

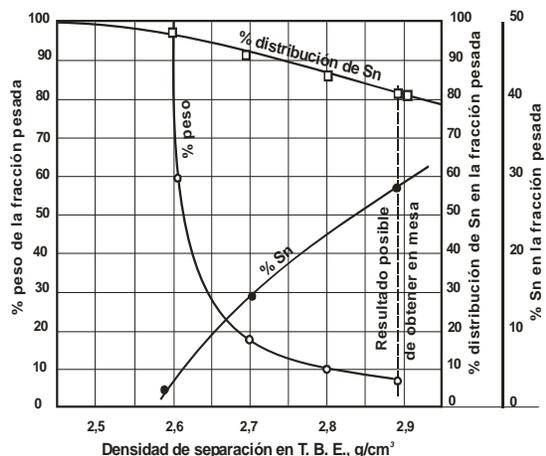


Figura 6. Análisis densimétrico del mineral B para comparación de resultados posibles de obtener con los de una concentración obtenida en mesa oscilante.

### 2.1.3. Diagrama de Tromp Aplicable a una Operación de Sink and Float

La tabla 4 adjunta, muestra un balance metalúrgico de sink and float obtenido en laboratorio con pulpas y menas de la planta Sink and Float de Siglo XX; estos resultados son típicos del uso de una pulpa pesada de ferrosilicio de las siguientes características:

Densidad	$\rho_{50} = 2,50$
Ferrosilicio	- 60 # Tyler
Lamas	15%
Frontera de Bingham	$F_B = 160 \text{ dinas/cm}^2$
Viscosidad	165 centipoises
Estabilidad	90%

TABLA 4. Balance metalúrgico de una operación de sink and float con minerales de Siglo XX [12], empleando pulpa de viscosidad natural.

Producto	% Peso	% Sn	% Distribución
Sink	46,49	0,74	67,47
Float	53,51	0,31	32,53
Cabeza calculada	100,00	0,51	100,00
Cabeza ensayada		0,50	

Si no consideramos otro criterio diferente al balance metalúrgico de los resultados anteriores, deduciríamos que:

- La recuperación es baja para tratarse de una operación de preconcentración.
- Posiblemente sería necesario disminuir la densidad para mejorar la recuperación.
- Quizá fuese conveniente cambiar la granulometría de la carga para mejorar la liberación del material estéril y conseguir colas más bajas.

Sin embargo, si se construye el diagrama de Tromp para esta operación (curva 1 en la figura 7), se deduce que:

- La densidad real de separación corresponde a  $\rho = 2,62$  y no a la densidad de pulpa  $\rho = 2,5$  g/cc.
- Existen dos etapas de separación que superpuestas dan la inflexión del diagrama de Tromp entre las densidades 2,66 y 2,72 g/cc.
- Los productos de densidades comprendidas entre 2,67 y 2,72 y mayores a 2,72 no responden al proceso y solamente sufren un cuarteo en la proporción de 35 y 25%, respectivamente, lo que significa que se podría incrementar la recuperación de estaño en el producto sink.

Estos efectos negativos podrían deberse a una viscosidad muy alta en las pulpas que darían origen a propiedades reológicas no muy favorables para aplicar el proceso a minerales que tienen poca diferencia de pesos específicos.

Repitiendo la prueba con los mismos materiales y pulpas anteriores, pero regulando la viscosidad [12], se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 5. Balance metalúrgico de una operación de sink and float con minerales de Siglo XX, empleando pulpa de viscosidad controlada.

Producto	% Peso	% Sn	% Distribución
Sink	40,03	1,00	79,61
Float	59,97	0,17	20,39
Cabeza calculada	100,00	0,50	100,00
Cabeza ensayada		0,50	

Las características de la pulpa empleada fueron las siguientes:

- $\rho$  2,55 g/cc
- $F_B$  90 dinas/cm<sup>2</sup>
- $\eta$  70 centipoises

La curva de Tromp (figura 7, curva 2), muestra el mejoramiento obtenido en la operación.

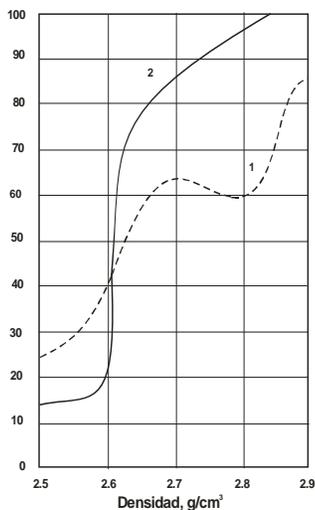


Figura 7. Diagrama de eficiencia de Tromp para pre-concentración con pulpas pesadas de Siglo XX. 1) pulpa natural. 2) Pulpa mejorada con Orzan S.

Como se deduce de la comparación de ambas tablas (4 y 5), el incremento de la recuperación logrado con solo disminuir la viscosidad de la pulpa demuestra de aplicar los diagramas de eficiencia en operaciones de sink and float.

### 3. Diagramas de Mayer

Existen procesos en los cuales es difícil analizar los productos obtenidos en base a las propiedades que sirvieron para separarlos, por ejemplo es muy difícil medir la flotabilidad de las diferentes partículas que forman el concentrado luego de que la carga haya sido flotada; en estos casos difíciles se utilizan otros tipos de diagramas como los de Henry y Reinhardt [13], los diagramas  $v - m$  [14], los diagramas de Mayer [15] o los diagramas Size by Size [25],

El diagrama original de Mayer es un ploteo del % peso del concentrado (0 a 100%) en el eje de las ordenadas contra la ley del concentrado (acumulado), en el eje de las abscisas. El diagrama se construye tomando fracciones del concentrado, de segundas y colas hasta lograr el 100% de la carga. La figura 8 muestra una representación clásica de este diagrama construido en base a los datos de la tabla No 6 de una caracterización densimétrica de una mena de carbón en líquidos densos [1].

En esta tabla, en la columna 1 está el rango de densidades de cada fracción, en la columna 2 se registra el % Peso de cada fracción "i". En la columna 3 están los contenidos de cenizas, que son la impureza en la producción de carbón; en minería metálica se colocará en esta columna la ley del metal, en la columna 4 va la cantidad de ceniza o lo que en nuestro medio llamamos "las unidades" de un elemento metálico en la fracción "i" (%peso x % Ley).

En la columna 5 se calcula el % peso acumulado del producto liviano (Float) para diferentes densidades de separación, porque ese será el material a ser recuperado durante la concentración del carbón; en minería metálica se tendrá que calcular el % Peso de la fracción pesada (sink). Este % Peso recalcula por:

$$v_{i,j} = \sum_{i=1}^j p_i \quad (\%)$$

Para una transición a una determinada fracción "1" se debe integrar la ecuación anterior:

$$V_1 = \int dv \quad (\%)$$

La columna 6 reporta el contenido en cenizas (expresado en unidades):

$$\sum_{i=1}^j (p_i \cdot a_i)$$

Y respectivamente:

$$\int a \cdot dv$$

Donde  $a = f(v)$

La columna 7 es el cálculo de la ley en cenizas de un producto "float" dentro de un rango de densidades desde i hasta j.

$$a_{1,j} = \frac{\sum_{i=1}^j (p_i \cdot a_i)}{\sum_{i=1}^j p_i}$$

En las columnas 8, 9 y 10 se tienen los mismos valores anteriores, pero calculados para el producto "sink"

Tabla No 6. Caracterización densimétrica de una mena de carbón para la construcción del diagrama de Mayer [1].1

Fracciones densimétricas	% Peso de la Fracción $P_i$ (%)	Contenido porcentual de cenizas en cada fracción $a_i$ (%)	Unidades de cenizas $P_i \cdot a_i$	PRODUCTO FLOAT			PRODUCTO SINK		
				% Peso Acumulado en el float $v_{i,j} = \sum_{i=1}^j p_i$ (%)	Unidades de cenizas acumuladas en el float $\sum_{i=1}^j (p_i \cdot a_i)$	Contenido porcentual de cenizas en el float $a_{1,j} = \frac{\sum_{i=1}^j (p_i \cdot a_i)}{\sum_{i=1}^j p_i}$ (%)	% Peso acumulado en el sink $v_{2,j} = \sum_{i=j}^n p_i$ (%)	Unidades de cenizas acumuladas en el sink $\sum_{i=j}^n (p_i \cdot a_i)$	Contenido porcentual de cenizas en el sink $a_{2,j} = \frac{\sum_{i=j}^n (p_i \cdot a_i)}{\sum_{i=j}^n p_i}$ (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1,30	49,4	1,7	84,0	49,4	84,0	1,7	100,0	1.782,7	17,8
1,30 a 1,40	20,6	5,3	109,2	70,0	193,2	2,8	50,9	1.698,7	33,6
1,40 a 1,50	6,3	15,6	98,3	76,3	291,5	3,8	30,0	1.589,5	52,9
1,50 a 1,60	4,0	26,8	107,2	80,3	398,7	4,9	23,7	1.491,2	62,8
1,60 a 1,80	2,9	39,5	114,6	83,2	513,3	6,2	19,7	1.384,0	70,3
1,80 a 2,00	2,2	59,8	131,6	85,4	644,9	7,6	16,8	1.269,4	75,7
2,00 a 2,20	2,5	71,3	178,3	87,9	823,2	9,4	14,6	1.137,8	77,8
+2,20	12,1	79,3	959,5	100,0	1.782,7	17,8	12,1	959,7	79,3
Suma	100,0	-----	1.782,7	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Existen numerosas variaciones de la forma de representar el diagrama de Mayer, como la utilizada por Dell [16], que es un ploteo de la recuperación del elemento en el eje de las ordenadas contra el "peso acumulado del concentrado dividido entre el contenido de fino total de la carga", en otros términos:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m w_i g_i}{\sum_{i=1}^m w_i g_i}$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m w_i}{\sum_{i=1}^m w_i g_i}$$

Dónde:

$\sum_{i=1}^m$  = Sumatoria desde la fracción 1 hasta la fracción  $i$ ;

$\sum_{i=1}^m$  = Sumatoria desde la fracción 1 hasta la fracción  $m$ ;

$w_i$  = peso de la fracción  $i$

$w_i$  = ley de la fracción  $i$

La gradiente de este diagrama da la ley del concentrado

Un sistema nuevo de representar las curvas de Mayer ilustra la figura 9, llamada "curva de liberación", para los datos de la tabla 7.

En este caso la recuperación de cobre se plotea contra  $100 \cdot C / fF$  ( $C$  = peso del concentrado,  $fF$  = finos en la alimentación); la gradiente de la curva representa la ley del concentrado. El diagrama se construye sumando progresivamente los concentrados, segundos y colas y permite calcular en el gráfico final la ley, peso y recuperación de cualquier programación que se desee obtener. Por ejemplo, con referencia a la figura 9, el vector OA representa el concentrado, el AB las segundas y el BC las colas; en el eje de las ordenadas se puede deducir la recuperación de cada uno de los productos y las pendientes de los vectores OA, AB y BC dan la ley del elemento en cada producto. La línea que une los puntos OC corresponde a un simple "cuarteo" sin ninguna concentración.

El mejor resultado sería aquel en el que se obtenga 100% de recuperación de un concentrado cuyo peso sea sólo el del mineral "puro" que se desea concentrar (casiterita, galena, covelina, etc.) y si se comparan varios resultados de pruebas realizadas en diferentes condiciones, la mejor será aquella que se acerque al resultado ideal.

Esta perfección puede ser calculada matemáticamente:

$$B = \frac{AT}{A_{ideal}} * 100 = \frac{\int_0^{100} S_{(v)} - r_{(v)} dr}{\int_0^{100} t_{(v)} - r_{(v)} dr} * 100 \quad \%$$

Las superficies pueden determinarse con ayuda de un planímetro o por integración de superficies siguiendo el método de Dell [16].

Para facilitar la construcción geométrica y el análisis es conveniente plotear la curva en un papel transparente. Entonces se adopta el siguiente procedimiento:

Se asume que la curva es una hipérbola y se dobla la hoja del gráfico de tal modo que se encuentre la dirección del eje, el que con frecuencia se encuentra en una línea con gradiente aproximada de -1, y las dos mitades de curva coinciden lo mejor posible; si no se puede hacer esto, la curva no será una hipérbola. Si se puede obtener coincidencia dentro los límites razonables de error, es posible hallar la ecuación correspondiente [17], que puede ser aplicada para encontrar las condiciones óptimas de operación (B = 100%), como muestra la figura 10 para una flotación de cobre en función de la granulometría de la carga.

TABLA 7. Balance metalúrgico de una flotación de cobre [16].

Fracciones	Peso g	% peso Total	Ley % Cu	Peso Acum.	Unidades	Unidades	Finos de Cu	Recuperación	Recuperación	$\frac{C}{fF} * 100$
Concentrado 1	88	7,5	9,9	7,5	374,2	374,2	43,3	58,2	58,2	117
Concentrado 2	98	8,2	16,8	15,7	137,8	512,0	16,4	21,8	80,0	130
Concentrado 3	210	17,7	4,7	33,5	83,2	595,2	9,8	13,0	93,0	278
Concentrado 4	172	14,4	1,8	47,8	25,9	621,1	3,1	4,1	97,1	228
Colas	622	52,2	0,3	100,0	15,7	636,8	2,2	2,9	100,0	824
Alimentación		100,0	6,4				75,4	100,0		1.577

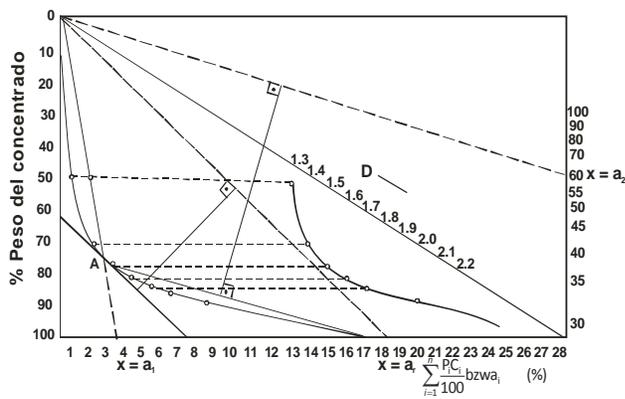


Figura 8. Diagrama de Mayer, para el lavado de carbón, según Schubert [1].

#### 4. Curvas de distribución

Las curvas de “liberación” anteriores no deben ser interpretadas en el sentido estricto de la liberación mineralógica, sino únicamente como indicadores de selectividad del proceso que se esté estudiando.

Así lo entendió Ruiz L., quién denomina a estos diagramas como “curvas de distribución” [18], y las recomienda para establecer los comportamientos de los minerales en los procesos de enriquecimiento gravimétrico.

Por la utilidad de esta aplicación se transcribe en la tabla 8, el sistema de cálculo de las curvas de distribución, según [18].

Para confeccionar esta tabla se sigue el siguiente procedimiento: a partir de los datos de laboratorio de las

columnas 1, 2, y 3 de la tabla 8 se sigue con los cálculos para la construcción de las curvas de distribución. El método seguido para la construcción de estas tablas es el siguiente:

El peso en porcentaje de cada una de las fracciones (columna 2) se multiplica por su correspondiente ley (columna 3), para obtener las unidades de estaño de las fracciones (columna 4). El acumulativo del peso en por ciento y las unidades del producto que se hunde (sink), (columnas 5 y 6), se obtienen acumulando las columnas 2 y 4 de arriba hacia abajo. La columna 6 se divide por la columna 5 para obtener las leyes de las fracciones acumuladas (columna 7). El acumulativo del peso en por ciento y las unidades del producto liviano (float), se obtiene de la misma manera que para el producto pesado, excepto que las de las columnas 2 y 4 se acumulan de abajo hacia arriba (columnas 8 y 9). La columna 9 se divide por la columna 8 para obtener las leyes de las fracciones acumuladas del material liviano (columna 10). Los valores de la ordenada E se hallan resolviendo la siguiente ecuación:

$$E = X + \frac{Y}{2}$$

Donde X es igual al acumulativo del peso en porcentaje del producto pesado que antecede a la densidad donde se quiere hallar el valor de E (columna 5). Y es igual al peso en porcentaje del producto en la densidad donde se está calculando el valor de E (columna 2), que se muestra en la columna 11 de la tabla. El significado de E resultaría ser el peso probable de producto sink que se obtiene al hacer el corte a una densidad Y determinada, pues los productos de esa densidad se distribuirán a 50% en float y sink por la definición de “densidad de separación” similar al  $d_{50}$  del diagrama de Tromp, y en consecuencia el peso del producto pesado resultará siendo el peso acumulativo hasta la

densidad anterior mas la mitad del peso en la fracción de la densidad de corte.

La columna 12 da la distribución acumulada de Sn en cada fracción del producto sink (calculada dividiendo el valor respectivo de "unidades" de la columna 6 entre la suma total de unidades de la misma columna,  $\Sigma = 37,63$ ).

La distribución de estaño en cada densidad (columna 13), se obtiene por diferencias de valores consecutivos en la columna 12 de acuerdo a la siguiente relación:

$$D_p = D_p A - DA_{p-1}$$

Ejemplo:

$$5,34 = 88,81 - 83,47$$

La recuperación posible a la densidad de corte (columna 14), se calcula con la siguiente relación:

$$R = DA_{p-1} + \frac{D_p}{2}$$

Ejemplo:

$$86,14 = 83,47 - 5,34/2$$

Donde:

DA<sub>p-1</sub> Distribución acumulada a la densidad anterior.

D<sub>p</sub> Distribución de estaño en la fracción del corte.

Los datos de la tabla 8 se representan en la figura 11, que contiene las denominadas "curvas de distribución" ploteadas del siguiente modo:

1. Distribución del producto sink para una recuperación ideal (F), columnas 11 y 7.
2. Acumulativo del preconcentrado sink (P), columnas 5 y 7.
3. Acumulativo de colas float (C), columnas 8 y 10.
4. Densidades de separación (D), columnas 1 y 5.
5. Recuperación posible de estaño (R), columnas 14 y 7.

Con ayuda de estos diagramas se puede determinar rápidamente la preconcentrabilidad de la muestra, pues si se decide realizar una separación por densidades (sink and float) a densidad 2,70, por ejemplo, se tendrían que obtener los siguientes resultados.

% peso del producto sink	13,93%
Ley del producto sink	1,39% Sn
Descarte de las colas float	86,07%
Recuperación de estaño	61,58%

ES posible trazar otras curvas adicionales que cada metalurgista crea necesarias para recibir mayor información, utilizando los mismos datos de la tabla 8.

Estas curvas típicas según su forma, constituyen indicadores de la concentrabilidad del mineral como se ilustra en la figura 12.

TABLA 8. Análisis densimétrico de una mena de estaño de Siglo XX, Empresa Minera Catavi, para un estudio de preconcentración por sink and float [18].

Grado de trituración - 2", fracción -2" + 3/8"

Preconcentrados sink				Colas (float)						Ordenada		Distr. Acum.	Distr. Fracc.	Recuperación
Fracciones separadas				Acumulativo pesado			Acumulativo liviano			E				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	
Densidad	% Peso	% Sn	Unidades	% Peso	Unidades	% Sn	% Peso	Unidades	% Sn	s/ec.	% Dist. acum. Sn	% Dist. Sn	% Recuperación	
2,74	4,25	4,19	17,81	4,25	17,81	4,19	100,00	37,63	0,38	2,13	47,33	47,33	47,33	
2,72	6,11	0,68	4,15	10,36	21,96	2,12	95,75	19,82	0,21	7,31	58,36	11,03	52,85	
2,70	7,13	0,34	2,42	17,49	24,38	1,39	89,64	15,67	0,17	13,93	64,79	6,43	61,58	
2,68	10,54	0,24	2,53	28,03	26,91	0,96	82,51	13,25	0,16	22,76	71,51	6,72	68,15	
2,66	14,99	0,14	2,10	43,02	29,01	0,67	71,97	10,72	0,15	35,53	77,09	5,58	74,30	
2,64	17,16	0,14	2,40	60,18	31,41	0,52	56,98	8,62	0,15	51,60	83,47	6,38	80,28	
2,62	10,60	0,19	2,01	70,78	33,42	0,47	39,82	6,22	0,16	65,48	88,81	5,34	86,14	
2,60	2,44	0,19	0,46	73,22	33,88	0,46	29,22	4,21	0,14	72,00	90,03	1,22	89,42	
2,60	26,78	0,14	3,75	100,00	37,63	0,38	26,78	3,75	0,14	86,61	100,00	9,97	95,02	
	100,00	0,38	37,63											

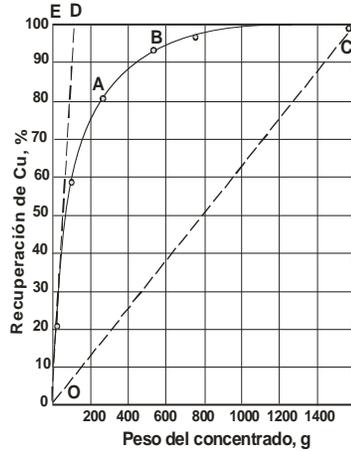


Figura 9. Curva de liberación para una flotación de cobre [16].

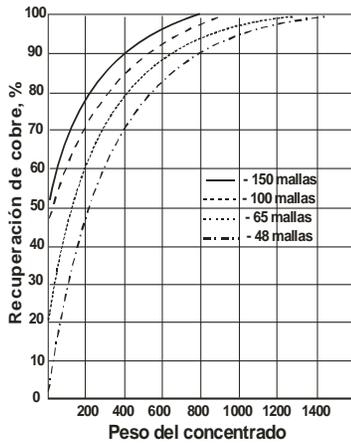


Figura 10. Influencia de la molienda sobre la flotación de cobre [16].

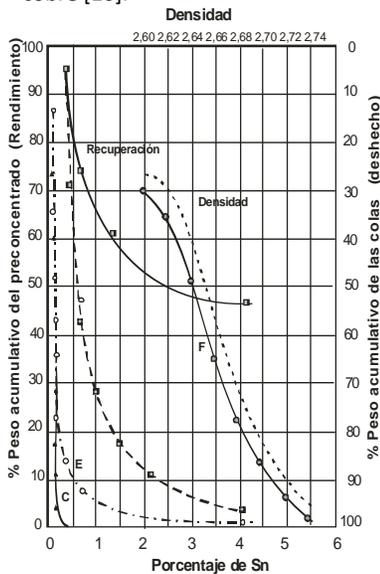


Figura 11. Curvas de distribución

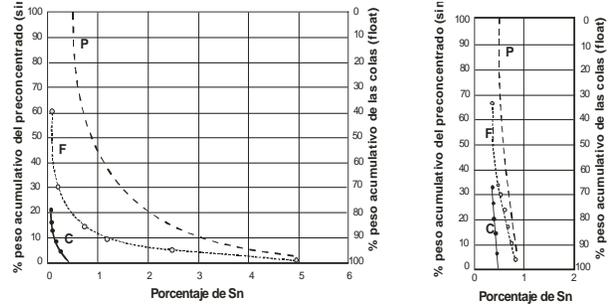


Figura 12. a) Curvas de distribución idealizadas para una mena estañífera fácil de concentrar. b) Curvas de distribución idealizadas para una mena estañífera difícil de concentrar.

## 5. Sistemas matemáticos

Existen en la literatura numerosas ecuaciones propuestas para el cálculo de la eficiencia de un proceso metalúrgico [19], [20], [21], [22], [23]. No es el propósito de este artículo señalar cual de los índices es mejor, sino simplemente demostrar como un criterio de eficiencia puede facilitar la selección de variables en un proceso de preconcentración de minerales.

Consideremos el siguiente índice de eficiencia:

$$E = \frac{\%R - \%P}{1 - \frac{LK}{LT}}$$

E Eficiencia

%R Porcentaje de recuperación

%P Por ciento peso del concentrado

LK Ley del metal en el concentrado

LT Ley teórica en metal del mineral puro (casiterita pura 78,76% Sn)

Esta forma de cálculo de la eficiencia puede ser útil en numerosos procesos de concentración de minerales, particularmente en los casos en que es embarazoso determinar las condiciones más favorables de operación.

A título de ejemplo consideremos el caso de preconcentración sink and float de un determinado mineral. Los resultados preliminares de laboratorio obtenidos en líquidos pesados se representan en la figura 13.

De no existir exigencias bien específicas bajo las cuales debería ser realizada la preconcentración de la mena por S&F (descarte o recuperación mínima aceptable, ley cutt-off, etc.), la experiencia profesional podría recomendar un rango de densidades de separación comprendido entre los puntos A y B (figura 13); sin embargo, considerando la economía del proceso o la mayor eficiencia posible, dentro del rango "recomendable" de trabajo, es posible definir una densidad precisa de separación partiendo de algún criterio adicional. Este criterio podría estar definido por la ecuación anterior cuya representación gráfica en la figura 13 es la curva 3, y de

allí deducimos que existe una densidad mas eficiente para el tratamiento de la mena.

Otro índice muy conocido es el índice de eficiencia de Schulz [19], como función de las leyes, recuperación, porcentaje en peso de los productos en la alimentación, concentrado y colas:

$$E_s = R - R_g = R_{gt} - R_t = R + R_{gt} - 100$$

$$E_s = \frac{R C_m (c - f)}{C (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{M C_m (c - f)}{F (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{C_m (R - M)}{C_m - F}$$

$$E_s = \frac{R_t C_m (f - t)}{t (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{(100 - M) C_m (f - t)}{f (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{100 C_m (f - t) (C - f)}{f (C - t) (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{R C_m (E_r - 1)}{E_r (C_m - f)}$$

$$E_s = \frac{M C_m (E_r - 1)}{C_m - f}$$

Con la siguiente nomenclatura:

- C % de ley en metal del concentrado.
- C<sub>m</sub> % de ley teórica en metal del mineral puro (casiterita pura 78,76% Sn).
- f % de ley de metal en la alimentación.
- t % de ley de metal en las colas.
- E<sub>r</sub> Relación de enriquecimiento, E<sub>r</sub> = c/f.
- R % de recuperación en el concentrado.
- M % de masa (peso) de la alimentación que llega al concentrado.
- R<sub>g</sub> % de masa (peso) de la ganga en la alimentación que llega al concentrado.
- R<sub>gt</sub> % de masa de la ganga en la alimentación que llega a las colas.
- R<sub>t</sub> % de recuperación (ó pérdida de metal) en las colas.
- E<sub>s</sub> % de eficiencia de separación.

### 6. Análisis Densimétricos

Para la mayor parte de los diagramas presentados en esta publicación, es necesario realizar análisis densimétricos de los minerales en estudio en líquidos orgánicos.

Corrientemente, se utilizan los siguientes líquidos orgánicos:

Producto	Composición	Color	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Bromoformo	CHBr <sub>3</sub>	Incoloro	2,890
Tetrabromoetano	CHBr <sub>2</sub> CHBr <sub>2</sub>	Incoloro	2,964
Ioduro de metileno	CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	Incoloro	3,325
Solución Clereci	CH <sub>2</sub> (COOTi) <sub>2</sub> -HCOOTi	Amarillo o café	4,280

Si es necesario utilizar mayores pesos específicos existen dos alternativas:

- a) Sales fundidas
- b) Suspensiones densas

Las sales fundidas de metales y aleaciones tienen el inconveniente de que no se pueden utilizar a temperatura ambiente; este inconveniente se resuelve utilizando un proceso desarrollado por A. Desnoes [24], que consiste en preparar una emulsión o fina dispersión de gotitas de mercurio en bromoformo (como las pulpas de FeSi y agua), pudiéndose obtener densidades comprendidas entre 2,5 y 7 g/cm<sup>3</sup>, y efectuar separaciones de granos hasta de 0,1 mm.

Las condiciones de preparación de esta suspensión son las siguientes:

- 600 cc de bromoformo (o tetrabromoetano)
- 360 cc de mercurio
- 0,3 g de amina grasa
- Agitación de 45 minutos
- Velocidad de agitación del motor turbo-dispersor de 10.000 rpm.
- Recipiente de agitación de vidrio refrigerado.

Si se desea soluciones menos densas se agrega más bromoformo. El mercurio debe ser puro y no contener metales disueltos. El bromoformo no debe contener agua, para ello se purifica con cloruro de calcio. La amina grasa hace el papel de agente emulsificante, aunque su rol parece ser diferente al conocido en flotación; buenos resultados se consiguen con lauril-amina, pero en la eventualidad pueden emplearse otras aminas grasas.

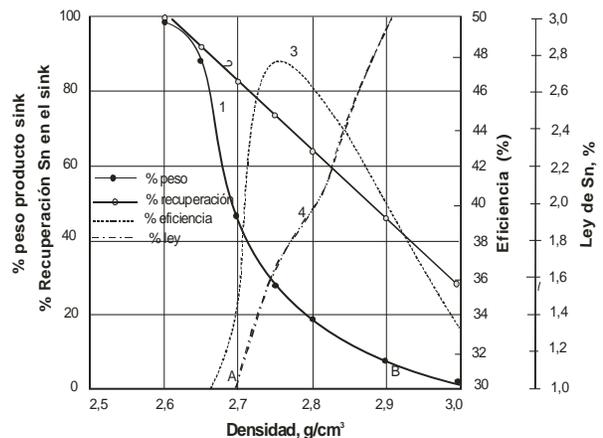


Figura 13. Diagramas de concentrabilidad para un estudio de sink and float.

## 7. Conclusiones

Este artículo sólo constituye un resumen de diferentes publicaciones técnicas sobre la evaluación de procesos de concentración de minerales y recopila datos de trabajos prácticos obtenidos en la cátedra de Concentración de Minerales II en la Facultad Nacional de Ingeniería, tiene el propósito de demostrar que la sola evaluación de un balance metalúrgico es incompleta para juzgar una operación de beneficio de minerales.

El empleo de diferentes diagramas de eficiencia y ecuaciones de eficiencia permitiría no solo conocer mejor los procesos tanto en escala de laboratorio como en la operación industrial, sino también abriría las posibilidades de obtener resultados más eficientes por una mejor operación metalúrgica.

Al recomendar a las empresas y técnicos el generalizar estos sistemas propuestos u otros aún más perfectos, sólo pretendemos estimular el mejor aprovechamiento de nuestros recursos no renovables. Nuestra carrera ofrece a los interesados manuales detallados de cálculos y uno de los procesos expuestos en este artículo.

## Referencias

1. SCHUBERT, H. *Aufbereitung Fester mineralischer Rohstoffe VEB Deutscher Verlas für Grundstoffindustrie Leipzig*. 1964
2. TERRA, A. "Essai d' une therie du lavage". *Revue de l'Industrie Minerale* 18, pg. 384-403, 1938.
3. TURPIN, J.; PINCON, A. "Separation granulometrique. Definition d' efficacite des appareils. Utilization des courbes de partage". *Revue de l'Industrie Minerale* 31, pg. 639-649, 1951.
4. MICHELIN, F. "La courbe de partage dans le criblage. Analogies avec la courbe de partage dans le lavage". *Revue de l'Industrie Minerale* 31, pg. 639-649, 1951.
5. MAYER, F. W. "Die Entstaubungsgradkurve ihr Wesen und ihre Anwendung auf die Verfeinerung der Gewährleistung bei Entstaubern. Staub: pg. 15-30, 1952.
6. EDER, Th. "Zur einheitlichen Kennzeichnung der Trennschärfe". *Montanzzeitung* 67, pg. 163-165, 1951.
7. EDER, Th. "Probleme der Trennschärfe". *Aufbereitungstechnik*. No 2, pg. 104-109, pg. 136-148, pg. 313-321, pg. 443-446, pg. 484-495, 1961.
8. CONCHA. "Clasificación". Chile: Universidad de Concepción, 1975.
9. MAYER, F. W. "Allgemeine grundlagen der T-Kurven". *Aufbereitungstechnik*, Nº 12, 1967.
10. TRAWINSKI, H. "Formulación matemática del diagrama de Tromp". *Aufbereitungs Technique*. 1976.
11. ODDOY. "Ciclones AKW y su uso en operaciones de clasificación de Minerales". Conferencia en la Universidad Técnica de Oruro, 1979.
12. SALAS, A., CORDOBA, J. "Control de las propiedades reológicas de las pulpas pesadas en los procesos sink and float de Siglo XX – COMIBOL". En: *II Simposio Internacional del Estaño*, La Paz – Bolivia, 1977.
13. HEINDENREICH, H. "Die Erfolgsrechnung im Aufbereitungsbetrieb". Verlag Glückauf GmbH, 1954.
14. HELFRICH, R., POUOLO, W. "Neue Kennzahlen für eine Beurteilung von Aufbereitungsprozessen. Freiburger Forschungshefte". H. A. No 281, pg. 193-219, 1963.
15. MAYER, F. W., "Die Mittelwertkurve, eine neue Verwachsungskurve". *Glukauf GmbH*, 1954.
16. DELL, C. C. "Relead Analysis from flotation test data".
17. CLOWET, A. "A mathematical form of mineral separation curves" IMM London, pg. 185-189, 1969.
18. RUIZ, E. "Aplicación de las curvas de distribución en la preconcentración de menas estanníferas por el método de sink and float". *Anales del IIMM*, Instituto Minero Metalúrgico. Oruro-Bolivia.
19. SCHULZ, N. F. "Separation Efficiency", *Trans. SME/AIME*. Vol. 247, pg. 81-87, 1970.
20. STEVENS, J. R., COLLINS D. N. *Trans. SME/AIME*. Vol. 220, pg 409-419, 1961.
21. DOUGLAS, E. "Derivation of basic efficiency formula for concentrating operations". *Bull IMM*. Vol. 71, pg 697-704, 1962.
22. SEYER, P. "Use of economic parameters in the mechanical preparation of ores". *Rev de l' Industrie Minerale*. Pg. 293-319, 1066.
23. PELAEZ, L. J. "El concepto de eficiencia en la concentración de minerales 1919 - 1975". *Revista Científica*. Universidad Tomás Frías. Potosí – Bolivia: No 4, Pg 24-47, 1979.
24. DESNOES, A. "Utilization des suspensions denses de mercure dans le bromoforme au laboratoire". *Revue de l'Industrie Minerale*. Danvier: pg 33-38, 1965.
25. SALAS, A. "Evaluación de circuitos de concentración de oro con diagramas Size by Size". En: *IV Seminario Técnico del Oro, la Plata y otros Metales Preciosos y I Seminario de los no Metálicos*. Salas Casado, Carlos (ed.). Potosí – Bolivia: 2002, 275 p.