



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDILLÍN

DEPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA MINAS

Flotación de sulfuros polimetálicos

Javier González Ocampo

Ingeniero Químico
Profesor de la Facultad de Minas.
Universidad Nacional de Colombia.
Apartado Aéreo 1027. Medellín Colombia

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la incidencia que tienen los factores granulometría, colectores, activadores, depresantes y pH sobre el tenor y la recuperación de los sulfuros de plomo, hierro y zinc en un proceso de flotación selectiva.

Los mejores tenores y recuperaciones para los concentrados de Pb, Fe, Zn fueron los siguientes: 54% y 81,22% para el plomo, 43% y 69,3% para el Fe; 55% y 88,76% para el Zn.

Los resultados experimentales obtenidos permiten considerar el proceso de flotación selectiva como la técnica más apropiada para la concentración de estos sulfuros.

Palabras claves

Flotación

Sulfuros

Concentración

ABSTRACT

This paper illustrates the effects of factors as particles size, collectors, activation, depressants and pH on the tenor and recuperation of lead, iron and zinc sulfides in a selective flotation process.

Better tenors and recuperations to concentrates of Pb, Fe, Zn were : 54% and 81,22% to lead; 43% and 69,3% to iron; 55% and 88,67% to zinc.

experimental results show that the process of selective flotation is the appropriate technique to the concentration of this sulfides.

Key words

Flotation

Sulfides

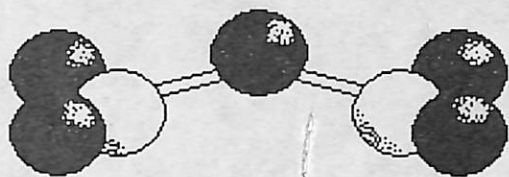
Concentration

I. INTRODUCCION

El material utilizado en el presente trabajo es un mineral procedente de la mina "La Echandía" localizada en la región de Marmato (Caldas). En esta mina los sulfuros se obtienen por concentración gravimétrica y los metales de oro y plata son recuperados por cianuración y amalgamación.

El objetivo de este trabajo fué obtener concentrados de sulfuros de plomo, hierro y zinc por el método de flotación selectiva y determinar los tenores de oro y plata para los respectivos concentrados.

El trabajo tuvo como punto de partida las investigaciones realizadas por Margarita Sierra y Alvaro Martínez (1) sobre flotación colectiva de sulfuros polimetálicos en la mina "La Maruja" del municipio de Marmato.



2. MATERIAL, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO

2.1 Caracterización del Mineral

El material del presente estudio es un mineral auro-argentífero procedente de la mina "La Echandía" situada en Marmato (Caldas).

Los filones de Marmato, están localizados en un cuerpo intrusivo compuesto de cuarzodiorita porfírica, que intruye esquistos cuarzo sericiticos dentro de la cuarzodiorítica. Las vetas consisten principalmente de cuarzo con calcita diseminada localmente, la pirita es el sulfuro predominante acompañado por galena, arseno-

pirita, marmatita (esfalerita rica en hierro), pirrotita y calcopirita (2).

El oro contenido esencialmente en la pirita, también se encuentra en pequeñas cantidades en la esfalerita y la galena; por lo general está incluido en la pirita en solución sólida. Además del oro se encuentran grandes cantidades de plata. Generalmente este metal se halla en forma de impurezas en la galena y la esfalerita (3).

Para determinar el tamaño promedio de las partículas del mineral de cabeza empleado para los análisis químico, mineralógico, ensayos al fuego y de liberación, se efectuó un análisis granulométrico.

Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 1. De esta Tabla puede observarse que el d_{80} de los granos es de 65 mallas.

TABLA 1.

Análisis Granulométrico (Serie Tyler)

Malla	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado
..48	149,50	8,16	8,16
65	252,80	21,96	13,80
100	336,10	18,36	40,32
150	326,60	17,84	58,16
200	289,00	15,78	73,94
270	151,00	8,25	82,19
325	120,00	6,55	88,74
-325	206,00	11,26	100,00

Los análisis realizados por Margarita Sierra y Alvaro Martínez (1), para un mineral procedente de la mina "La Maruja" en el municipio de Marmato, dieron como resultado un grado de liberación de los sulfuros de -100 mallas, este resultado fue tomado para la realización del presente trabajo por tratarse de un mineral de la misma zona y formación geológica. La liberación de sulfuro a sulfuro se dió a mallas más finas, dando los mejores resultados para la flotación selectiva a -270 mallas.

El análisis químico del mineral se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados en la Tabla 2.

TABLA 2.

Resultados del Análisis Químico

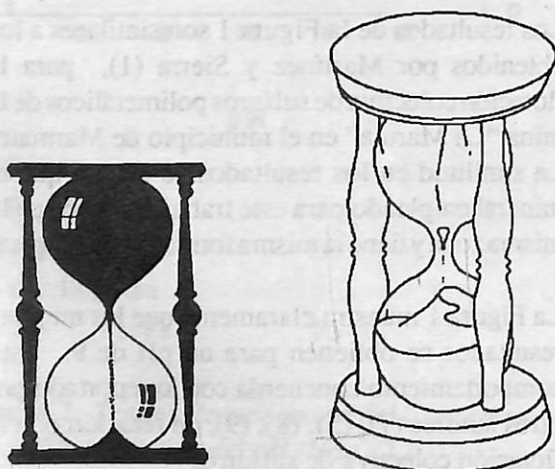
Elemento	Porcentaje (%)
SiO ₂	73,21
Fe	8,50
Zn	0,90
Pb	0,36
Cu	0,035
CaO	0,19
MgO	0,79
S	7,515

La composición mineralógica se estimó con base en el análisis químico y las observaciones macro y microscópicas del mineral de cabeza. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3.

Resultados de la Composición Mineralógica

Compuesto	Porcentaje (%)
Cuarzo (SiO ₂)	73,21
Pirita (FeSO ₄)	18,19
Galena (PbS)	0,414
Esfalerita (ZnS)	1,34
Calcopirita (CuFeS ₂)	0,101



El contenido de oro y plata en cada una de las frecciones granulométricas se presenta en la tabla 4.

TABLA 4.

Resultados de Ensayos al Fuego.

Malla	Oro (g/ton)	Plata (g/ton)
48	4	57
65	10	69
100	6	73
150	4	75
200	14	77
270	10	87
325	8	75
- 325	8	93
Cabeza	8	80

El equipo utilizado fue básicamente una celda para flotación Denver y potenciómetro digital.

Las condiciones empleadas para todas las pruebas de flotación fueron las siguientes: densidad de pulpa del 30% de sólidos, con una granulometría del 70% en peso entre las mallas -150 y 325 y con una agitación de 1200 revoluciones por minuto.

Inicialmente se hizo una flotación colectiva, tomando las mejores condiciones encontradas por Martínez y Sierra (1) y variando el pH, con el fin de corroborar la aplicación de estas condiciones al mineral en estudio.

Las condiciones empleadas fueron las siguientes:

- Depresor: Silicato de sodio (Na₂ SiO₃), 900 g/ton en solución al 50%.
- Acondicionador de pH: NaOH o cal.
- Colector: Isopropil Xantato de sodio (Z-11), 50 g/ton de mineral, en solución del 1%.
- Espumante: Aceite de pino, 15 g/ton mineral.

El concentrado obtenido en la flotación colectiva, fue acondicionado para flotar galena y deprimir la pirita y esfalerita. Las colas de las pruebas que dieron los mejores resultados de la flotación de galena fueron acondicionadas para obtener un

concentrado de esfalerita y las colas de esta flotación corresponden al concentrado final de pirita.

La determinación del pH, colector y concentración de depresante, activador y espumantes se realizó variando en cada prueba uno de estos factores y dejando las demás constantes, hasta encontrar las mejores condiciones para la flotación de los sulfuros minerales.

Para el caso de la galena, inicialmente se estableció el pH más adecuado de flotación. A este pH se hicieron pruebas variando la dosificación del sulfato de Zinc y cianuro. Por último, con las anteriores condiciones en sus valores más adecuados se estudió el efecto del colector, variando su dosificación.

Las colas del mejor concentrado de galena fueron acondicionados para flotar esfalerita, iniciándose por la variación del pH utilizando como regulador cal; para el pH que dió el concentrado de mejores características se realizaron pruebas variando la dosis del activador sulfato de cobre, y finalmente se realizaron pruebas para establecer el efecto del colector.

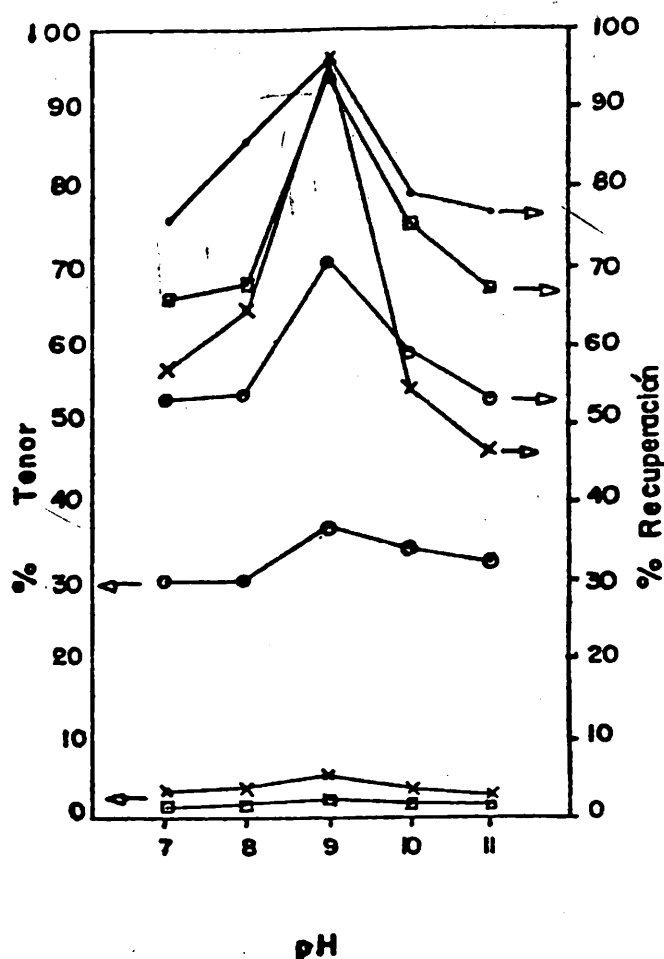
Como colector para la galena se seleccionó el dicresil ditiofosfato (Aerofloat 242 producido por la "American Cyanamid Company") por ser éste el más recomendado (4), (5), (6).

Como colector de la esfalerita se seleccionó el ditiofosfato dibutílico secundario de sodio (Aerofloat 238, producido por la "American Cyanamid Company") por ser el más adecuado para esta flotación (4), (5), (6).

Para la Flotación de galena y esfalerita se utilizó como espumante el aerofroth 65, producido por la "American Cyanamid Company" (4).

3. ANALISIS DE RESULTADOS

En la Figura 1 se presenta las variaciones en el tenor y la recuperación de los sulfuros de plomo, hierro, zinc y cobre en el concentrado colectivo para diferentes valores del pH.



Z - II : 50 g / ton

Na₂ SiO₃ : 900 g / ton

Aceite de pino : 15 g / ton

X : Zn : Fe Pb : Cu

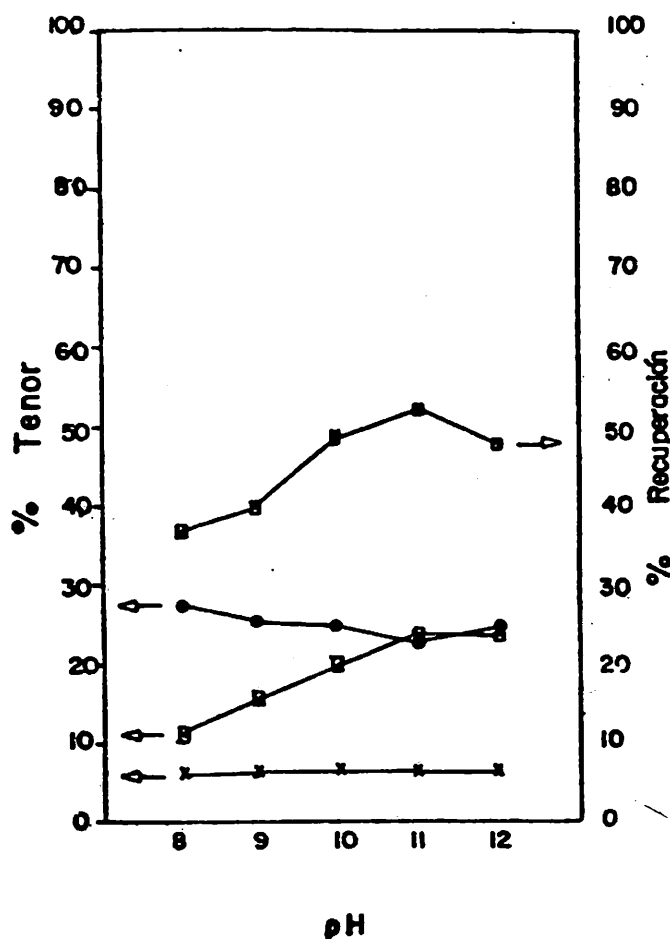
Figura 1. Tenor y Recuperación de la Flotación Bulk en función del pH

Los resultados de la Figura 1 son similares a los obtenidos por Martínez y Sierra (1), para la flotación colectiva de sulfuros polimetálicos de la mina "La Maruja" en el municipio de Marmato. La similitud en los resultados se debe a que el mineral empleado para este trabajo procede de la misma zona y tiene la misma formación geológica.

La Figura 1 muestra claramente que los mejores resultados se obtienen para un pH de 9. Este comportamiento concuerda con lo reportado por otros autores (7), (5), (8), (9), en relación con la flotación colectiva de sulfuros.

En la Figura 2, se presentan las variaciones en el tenor y la recuperación del concentrado de plomo con el pH, usando carbonato de sodio (Na_2CO_3) como regulador de este último.

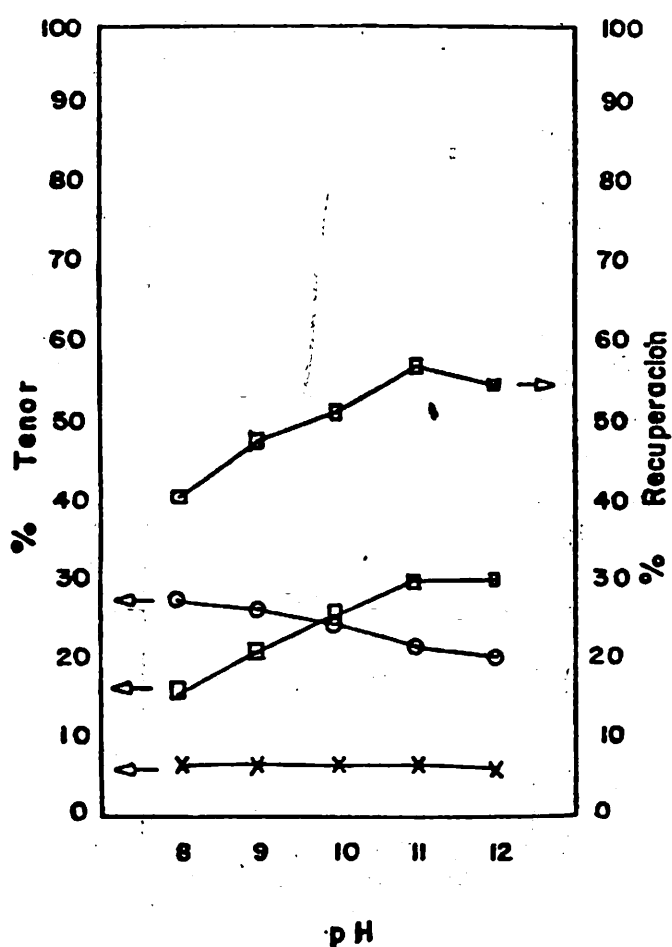
De la Figura 2 puede verse que la recuperación y tenor de plomo, en el concentrado de este metal, aumenta con el aumento del pH, obteniéndose los mejores resultados para un pH de 11. Sin embargo, los valores alcanzados a éste último pH son muy bajos y se presenta una alta contaminación de pirita.



Na Cn : 50 g / ton
Zn SO_4 : 50 g / ton
A - 242 : 50 g / ton
A - 65 : 10 g / ton
x : Zn .. Fe .. Pb

Figura 2. Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en función del pH (Na_2CO_3)

Con el fin de disminuir el tenor de pirita, y aumentar así el de plomo en el concentrado, se realizaron pruebas empleando como regulador cal. Se esperaba que el empleo de los iones calcio favoreciera la depresión de pirita (10), (8). En la Figura 3 se presentan los resultados de estas pruebas. De acuerdo con esta figura la máxima recuperación de plomo y tenor de este metal en el concentrado se obtiene para un pH de 11; el empleo de la cal no mejoró sustancialmente la depresión de la pirita.

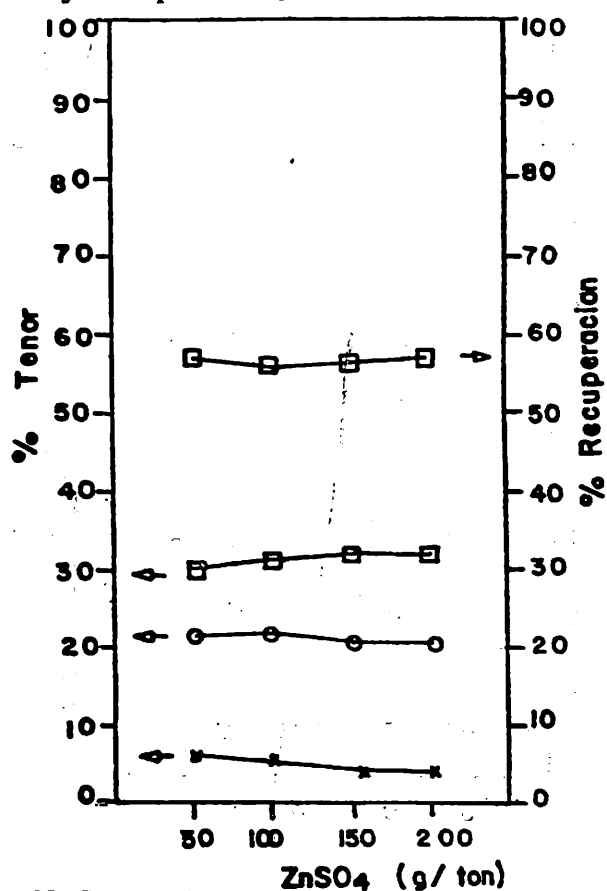


Na Cn : 50 g / ton
Zn SO_4 : 50 g / ton
A - 242 : 50 g / ton
A - 65 : 10 g / ton
x : Zn .. Fe .. Pb

Figura 3. Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en función del pH (cal)

La depresión de la pirita y la esfalerita se puede lograr mediante la acción del cianuro y el sulfato de zinc, y la posible adsorción de los iones de calcio y sodio; estos depresantes afectan muy poco la flotación de la galena.

Para mejorar la depresión de la esfalerita se hicieron pruebas encaminadas a determinar el efecto de la concentración de sulfato de zinc en la recuperación y tenor del concentrado de plomo. Los resultados obtenidos de estas pruebas se presentan en la Figura 4. De esta Figura puede verse que el empleo de 150 g/ton de sulfato de zinc mejoró un poco la depresión de la esfalerita.



Na Cn : 50 g / ton

Zn SO₄ : 50 g / ton

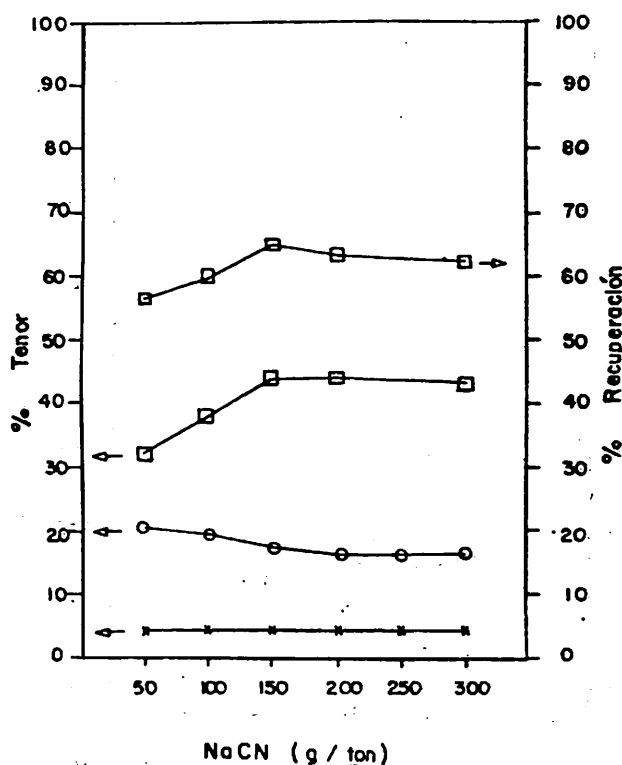
A - 242 : 50 g / ton

A - 65 : 10 g / ton

x : Zn .. Fe .. Pb

Figura 4. Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en función de la Concentración del sulfato de zinc (ZnSO₄)

Teniendo en cuenta que el cianuro actúa como depresor de la pirita y refuerza la depresión del sulfato de zinc sobre la esfalerita (8), se procedió a realizar pruebas variando la concentración de cianuro empleada. Los resultados se muestran en la Figura 5. De esta figura se concluye que el aumento de esta concentración no contribuye a una mejor depresión de la esfalerita, mejorando muy ligeramente la pirita.



ZnSO₄ : 150 g / ton

A - 242 : 50 g / ton

A - 65 : 10 g / ton

x : Zn .. Fe .. Pb

Figura 5. Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en función de la Concentración de Cianuro (NaCN)

Para lograr una mejor recuperación de plomo se realizaron pruebas tendientes a determinar el efecto de la cantidad de colector dicresil ditiofosfato, así como el refuerzo con el isopropil xantato de sodio. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 5 y 6 respectivamente. Según estas tablas la concentración más adecuada de dicresil ditiofosfato es de 50 g/ton de mineral, y la adición de isopropil xantato de sodio no tiene ningún efecto sobre el tenor y la recuperación de plomo en el concentrado.

TABLA 5.

Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en Función del Colector Dicresil-Ditiofosfato

Prueba A-242	Producto g/ton	Tenor (%)		Recuperación		Parcial (%)	
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
	Cabeza	0,36	0,9	8,5			
25	Concentrado	31,70	4,70	21,10	55,80	3,55	2,19
26	Concentrado	43,70	4,40	17,30	64,94	2,82	1,63
27	Concentrado	43,90	4,50	17,80	65,02	2,60	1,60
28	Concentrado	42,90	4,60	18,10	65,33	2,66	1,70

TABLA 6.

Tenor y Recuperación del Concentrado de Pb en Función de la Adición del Colector Isopropil Xantato de Sodio

Prueba Z-11	Producto g/ton	Tenor (%)		Recuperación		Parcial (%)	
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
	Cabeza	0,36	0,9	8,5			
29	Concentrado	44,30	4,50	18,00	64,64	2,41	1,38
30	Concentrado	41,25	4,75	16,50	65,26	2,99	1,39

El análisis granulométrico del material con el cual se realizaron todas las anteriores pruebas, tiene un 70% entre las mallas 150 y 325. Esto llevó a pensar que la causa del bajo tenor y recuperación de plomo podría ser la falta de liberación de los sulfuros entre sí.

Con base en lo anterior se procedió a hacer una remolienda del concentrado de la flotación colectiva, la cual se realizó en un mortero bajo las siguientes condiciones: NaCN, 150 g/ton de mineral, pH 11 acondicionado con cal y un tiempo de molienda de 30 minutos aproximadamente. La

Tabla 7 presenta el análisis granulométrico de la remolienda del concentrado colectivo.

TABLA 7.

Análisis Granulométrico de la Remolienda del Concentrado "Bulk"

Malla	Peso (g)	% Retenido	% Acumulado
200	15,25	5,00	5,00
270	73,20	24,00	29,00
325	54,90	18,00	47,00
-325	161,65	53,00	10,00

Los resultados de la flotación del concentrado remolido operando a las condiciones de la Figura 5, se presentan en la Tabla 8.

TABLA 8.

Efecto de la remolienda del concentrado Bulk en el tenor y la recuperación del Concentrado de Pb.

Prueba	Producto	Tenor (%)		Recuperación		Parcial (%)	
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
31	Cabeza	0,36	0,9	8,5			
	Concentrado	2,39	5,84	39,82	100	97,63	70,56
	Concentrado	54,00	4,00	13,40	81,23	2,46	1,21
	Colas Pb	0,47	5,91	40,77			

De acuerdo con esta Tabla el tenor y recuperación de plomo en el concentrado son 54% y 81.23% respectivamente. Puede concluirse que el aumento del tenor de plomo y la recuperación de este en el concentrado obedece a un mayor grado de liberación entre los sulfuros, logrado con la remolienda.

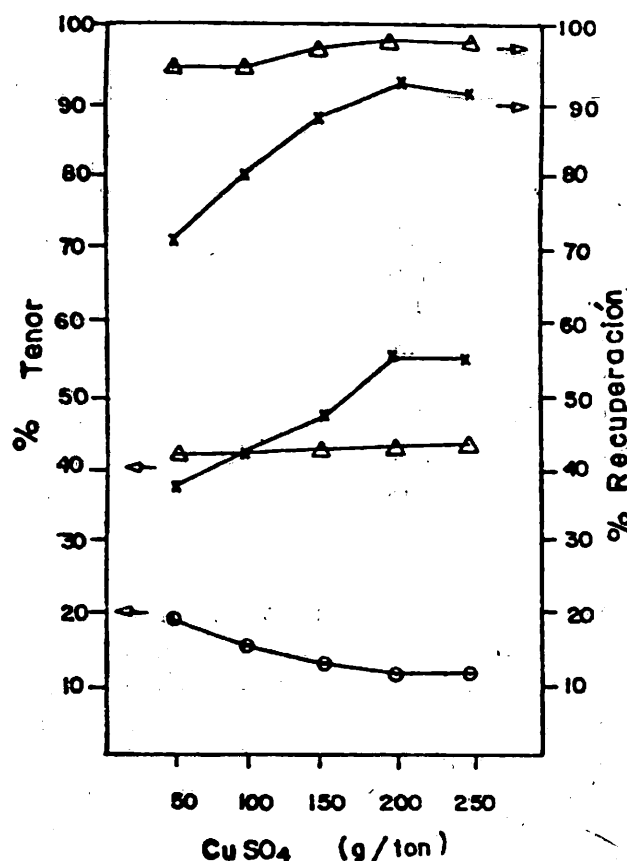
La granulometría obtenida con la remolienda no presentó problemas de finos en la flotación y se encuentra entre los rangos de tamaño dados por Trahar y Women (11) para lograr buenas recuperaciones en la flotación de sulfuros.

Las colas resultantes de las mejores condiciones de la flotación de plomo fueron acondicionados para flotar la esfalerita y deprimir la pirita. De pruebas efectuadas variando el pH, se encontró que los mejores resultados para la flotación de zinc se dan a un pH de 10, donde el tenor y la recuperación de zinc son 38% y 71.91% respectivamente.

En la Figura 6 se muestra el efecto del sulfato de cobre sobre el tenor y la recuperación del concentrado de zinc. De esta figura se concluye que los mejores resultados se alcanzan cuando la concen-

tración del sulfato es de 200 g/ton de mineral. Puede concluirse, por tanto, que el sulfato de cobre con esta concentración actúa efectivamente como activador de la esfalerita.

En la Figura 7 se muestra el efecto del colector dibutil ditiofosfato (Aerofloat 238) sobre el tenor y recuperación del concentrado de zinc. De esta figura se concluye que los mejores resultados se logran cuando la concentración del colector es de 50 g/ton de mineral. A estas condiciones el contenido de plomo es mínimo y el de hierro permisible.



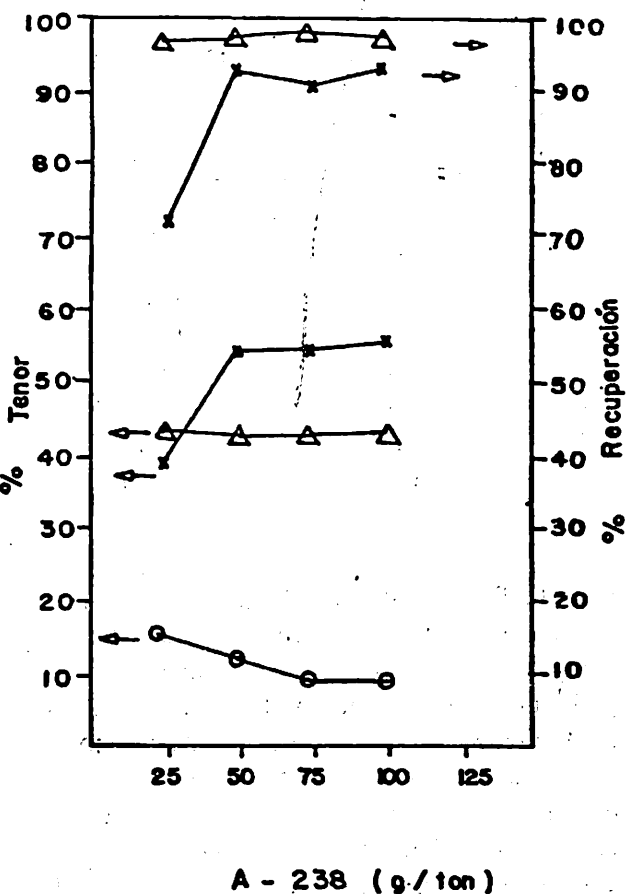
A - 238 : 50 g / TON

A - 65 : 5 g / ton

pH 10 : cal

x : Zn : Fe (concentrado) : Fe (colas)

Figura 6. Tenor y Recuperación del Concentrado y colas de Zn en función de la Concentración de Sulfato de Cobre (CuSO_4).



Cu So4 : 200 g / ton

A - 65 : . 5 g / ton

pH 10 : Cal

x : Zn : Fe (concentrado) : Fe (colas)

Figura 7. Tenor y Recuperación del Concentrado y colas de Zn en función del colector dibutil ditiofosfato (A-238).

En las Figuras 6 y 7 se muestra el efecto del activador y colector en los tenores y recuperaciones de las colas de zinc. De estos resultados se puede concluir que el tenor y recuperación en hierro mejora con el aumento en el tenor y la recuperación de zinc en el concentrado.

En la Tabla 9 se reportan los tenores de oro y plata presentes en los mejores concentrados de plomo, hierro y zinc.

TABLA 9.

Tenores de Oro y Plata en los Concentrados de Pb, Zn, Fe

Prueba	Concentrado	Tenor (%)			Au g/ton	Ag g/ton
		Pb	Zn	Fe		
3	Bulk	2,13	5,42	37,45	40	450
14	Pb	30,00	6,20	21,50	24	2.530
18	Pb	32,00	4,50	20,50	25	2.550
22	Pb	43,70	4,40	17,30	23	3.680
31	Pb	54,00	4,00	13,40	15	4.200
38	Zn	0,10	38,00	19,00	44	490
40	Zn	0,40	55,00	12,00	50	650
43	Fe	0,20	0,44	43,00	37	250

De esta Tabla se observa lo siguiente: para el concentrado de plomo, el tenor en plata se incrementa a medida que aumenta el tenor en plomo; y el tenor en oro decae con la disminución del tenor en hierro y zinc; para este concentrado se alcanzó el mejor tenor en plata (4200 g/ton). Para el concentrado de zinc, el tenor en oro subió con el aumento del tenor de este metal; para este concentrado se alcanzó el mayor tenor en oro (50 g/ton). Para el concentrado de hierro el tenor en oro fue de 37 g/ton.

Del análisis anterior se concluye que la plata se encuentra asociada principalmente a la galena, en tanto que el oro lo está a la esfalerita.

4. CONCLUSIONES

La flotación colectiva de los sulfuros minerales, seguida de la flotación de galena y depresión de

pirita y esfalerita, para luego activar la esfalerita y obtener un concentrado de esfalerita y unas colas que por su alto contenido en pirita se convierte en el concentrado final de pirita; se considera como el procedimiento más adecuado para la flotación del mineral Auro-argentífero de la región de Marmato (Caldas).

EL empleo de carbonato de sodio y la cal como reguladores del pH en la flotación de galena, influyen en la depresión de la pirita y esfalerita. No se da una marcada diferencia en los efectos producidos por estos reactivos.

Es necesario la remolienda del concentrado Bulk, por debajo de la malla 270 para que se de la liberación adecuada de los sulfuros entre si y por lo tanto una mejor recuperación y tenor en las flotaciones selectivas de plomo, zinc, hierro.

El cianuro y el sulfato de zinc deprimieron adecuadamente la pirita y esfalerita sin afectar la flotación de galena.

El sulfato de cobre y el colector dibutil ditiofosfato fueron efectivos en la activación e hidrofobización de la esfalerita.

Se obtienen buenos tenores y recuperaciones totales en los diferentes concentrados de plomo, zinc, hierro; siendo los mejores: 54% y 81,22% para el plomo; 55% y 88,76% para el zinc; 43% y 69,30% para el hierro.

Se determina que el oro está asociado principalmente a la esfalerita con un contenido de 50 g/ton en su concentrado y que la plata está asociada a la galena con un contenido en su concentrado de 4.200 g/ton.

5. BIBLIOGRAFIA

1. MARTINEZ, Alvaro., SIERRA, Margarita. Concentración por Flotación Colectiva de una Mena Polimetálica Proccedente de la Mina "La Maruja". UNAL, Facultad Minas. 1986.
2. ALVAREZ, Jairo; y ARIAS, Alfonso. Geología del Area de Marmato. Ingeominas, Medellín, No. 1573. pp 31-36. 1970 a.
3. PAGNACCO, Picro., RADELLI, Luigi. Informe Geológico de Marmato. Ingeominas, Bogotá. No. 1433. pp 6-8. 1962.
4. CYANAMID INTERNATIONAL. Manual de Productos Químicos para la Minería. New Jersey. No. 26. p 104. Nov. 1976.
5. DUDENKOV. S.V. et al. Fundamentos de la Teoría y la Práctica de Empleo de Reactivos de Flotación. URSS. Editorial MIR. 1980.
6. JACKES DE COYPER. A. N. Seminario sobre la Flotación de Minerales Tipo Sulfuros Complejos de Cu - Pb - Zn, Quito, Ecuador. Proyecto de Metalurgia Extractiva del Cobre, 1982. pp 39-52.
7. ASTUCURY, Venancio. Fundamentos y Aplicación de la Flotación de Minerales. Lima, Perú. Colección Ciencias, 1981. 223 p.
8. FUERSTENAU, M.C. Flotation, New York, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. INC. 1976. 620 p.
9. LEJA, Jan. Surface Chemistry of Froth Flotation, 2nd., New York, Plenum press, 1983. 758 p.
10. DOW CHEMICAL COMPANY. Fundamentos de Flotación. Los Angeles, 1985.
11. SOMASUNDARAN, P. Role of Surface Chemistry of Fine Sulphides in Their Flotation. Complex Sulfide ores Paper Conference, No. 10. pp 118-127. 1980.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

DEPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA MINAS