

**Flotacion bulk de sulfuros polimetálicos de mineral aurífero de la zona minera de
California Santander**

Freddy Andres Boada Galvis

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

MSc. en Ingenieria Metalurgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedicado en primer lugar a Dios por ayudarme en cada proceso de la carrera, por no dejarme decaer en cada dificultad que se me presentó, te doy gracias porque sin ti nada hubiera sido posible.

A mi madre Fabiola Galvis Rodríguez por darme la vida, por ser ese ejemplo a seguir, por ser ese apoyo constante e incondicional que siempre necesite para sacar adelante mi carrera y por enseñarme que las cosas se deben conseguir de manera honrada y con mucho esfuerzo, ojalá seas eterna mami.

A mi abuela Teresa Rodríguez por brindarme su apoyo a lo largo de la carrera, por sus consejos y por ser un gran ejemplo de superación.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por darme la oportunidad de formarme como ingeniero.

A mis familiares que me ayudaron y aportaron en mi crecimiento como persona y profesional.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por sus conocimientos brindados en el transcurso de toda la carrera.

A mi Director de proyecto Walter Pardavé por la compañía y la orientación brindada a lo largo de este proyecto.

A los técnicos de laboratorio por su amabilidad y servicio durante toda la carrera.

A esa mujer que ya no está en mi vida pero estuvo conmigo mucho tiempo y me brindó su apoyo y motivación para seguir adelante, gracias por su apoyo incondicional.

A mis compañeros, John Neira, Diego Medina, Carlos Antonio, entre otros. Porque con sus travesuras, ocurrencias y consejos hicieron más agradable esta etapa de mi vida que culmina con la formación como profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Flotación	16
2.3. Sulfuros Polimetálicos	16
2.4 Reactivos De Flotación.....	17
2.5 Antecedentes	18
3. Metodología	19
3.1 Muestreo del mineral	19
3.2 Caracterización del mineral	20
3.3 Liberación y preparación del mineral	20
3.4 Diseño experimental	21
3.5 Análisis de Resultados	21
4. Resultados	22
4.1 Caracterización del mineral	22
4.2 Liberación de minerales	25

4.3 Diseño experimental aplicado a la flotacion bulk.....	31
4.4 Aplicación del programa estadístico Statgraphics	34
5. Flujograma de flotación bulk	38
6. Conclusiones.....	39
Referencias Bibliográficas	41
Apéndices.....	44

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Sección delgada, muestra del mineral.....	22
<i>Figura 2.</i> Muestra del mineral evaluado en diferentes puntos.....	23
<i>Figura 3.</i> Análisis EDS para la pirita.....	24
<i>Figura 4.</i> Análisis EDS para el cuarzo	24
<i>Figura 5.</i> Análisis EDS para los aluminosilicatos	24
<i>Figura 6.</i> Análisis EDS para la caolinita	25
<i>Figura 7.</i> Análisis EDS para el sulfuro de cobre.....	25
<i>Figura 8.</i> Mosaico de resultados de liberación de minerales.....	27
<i>Figura 9.</i> Comparación entre % de recuperación en las diferentes pruebas de flotación bulk.....	34
<i>Figura 10.</i> Flujograma de flotación bulk de minerales polimetálicos de la zona minera de California Santander	38
<i>Figura 11.</i> Grado de liberación de minerales.....	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Resultados liberación del mineral para malla 14.</i>	27
Tabla 2. <i>Resultados liberación del mineral para malla 16.</i>	28
Tabla 3. <i>Resultados liberación del mineral para malla 18.</i>	28
Tabla 4. <i>Resultados liberación del mineral para malla 20.</i>	28
Tabla 5. <i>Resultados liberación del mineral para malla 30.</i>	29
Tabla 6. <i>Resultados liberación del mineral para malla 40.</i>	29
Tabla 7. <i>Resultados liberación del mineral para malla 60.</i>	29
Tabla 8. <i>Resultados liberación del mineral para malla 100.</i>	30
Tabla 9. <i>Resultados liberación del mineral para malla 120.</i>	30
Tabla 10. <i>Diseño de pruebas de flotación bulk.</i>	32
Tabla 11. <i>Diseño de pruebas para la recuperación de Oro.</i>	32
Tabla 12. <i>Diseño de pruebas para la recuperación de Plata</i>	33
Tabla 13. <i>Análisis estadístico del efecto del % de sólidos en flotación bulk.</i>	35
Tabla 14. <i>Análisis estadístico del efecto de la granulometría en flotación bulk.</i>	36
Tabla 15. <i>Análisis estadístico del efecto del consumo de reactivo en flotación bulk.</i>	37

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Flotación de minerales	44
Apéndice B. Ángulo de contacto entre superficie mineral y colector	47
Apéndice C. Liberación de minerales	51

Resumen

TITULO: FLOTACIÓN BULK DE SULFUROS POLIMETÁLICOS DE MINERAL AURÍFERO DE LA ZONA MINERA DE CALIFORNIA SANTANDER*.

AUTORES: Freddy Andrés Boada Galvis **

PALABRAS CLAVES: flotación bulk, mineral, mineral polimetálico, reactivos.

DESCRIPCIÓN:

El trabajo tiene como objetivo, realizar el proceso de Flotación Bulk de un deposito mineral polimetálico obtenido de una zona minera del municipio de California Santander, para ello, se utilizaron los procedimientos metalúrgicos correspondientes y la utilización de un programa estadístico llamado STATGRAPHICS que nos ayudara analizar de una mejor manera el comportamiento que se obtuvo en los resultados. El procedimiento realizado fue un diseño experimental exponencial 23 y al momento de estudiar el análisis de los resultados por medio del programa estadístico, podemos notar que mediante el proceso metalúrgico de flotación bulk, al aumentar el porcentaje de sólidos y el contenido de reactivos podremos obtener una mayor recuperación de oro.

Al terminar el proceso desarrollado mediante pruebas de laboratorio y mediante el programa estadístico STATGRAPHICS podemos notar que los resultados fueron muy similares tanto para la recuperación de oro, como para la recuperación de plata, esto indica que el proceso se realizo de manera correcta y se hizo lo posible para recuperar el máximo de dichos minerales y así mismo concluir que no es recomendable utilizar este proceso ya que las recuperaciones fueron bajas.

Como resultado del proceso se ha obtenido una recuperación baja debido a que el oro presente asociado a sulfuros se encuentra en tamaños de 2 micras y posiblemente encapsulado en la pirita y en compuestos de telurio lo cual dificulta su liberación y su beneficio mediante Flotación bulk o colectiva.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y ciencia de los materiales Director: MSc. Walter Pardavé Livia

Abstract

TITLE: BULK FLOAT OF SULFUROS POLYMETALS OF MINERAL AURIFERO OF THE MINING AREA OF CALIFORNIA SANTANDER*.

AUTHORS: Boada Galvis, Freddy Andrés **

KEY WORDS: bulk flotation, mineral, polymetallic mineral, reagents.

DESCRIPTION:

The work has the objective, to perform the bulk flotation process of a polymetallic mineral deposit obtained from a mining area of the municipality of California Santander, for this, the corresponding metallurgical procedures and the use of a statistical program called STATGRAPHICS that will help us analyze in a better way the behavior that was obtained in the results. The procedure performed was an exponential experimental design 23 and when studying the analysis of the results through the statistical program, we can note that through the metallurgical process of bulk flotation, by increasing the percentage of solids and reagent content we can obtain a greater recovery of gold.

At the end of the process developed through laboratory tests and through the statistical program STATISTICS, we can see that the results were very similar both for the recovery of gold and for the recovery of silver, this indicates that the process was carried out correctly and was done the possible to recover the maximum of these minerals and also to conclude that it is not advisable to use this process because the recoveries were low.

As a result of the process, a low recovery has been obtained because the gold present associated with sulphides is in sizes of 2 microns and possibly encapsulated in pyrite and in tellurium compounds which hinders its release and its benefit by bulk or collective flotation.

* Degree project

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: MSc. Walter Pardavé Livia

Introducción

En la zona minera de California, Santander hay minerales polimetálicos que se debe explorar y posiblemente explotar con tecnologías de bajo impacto ambiental.

Uno de los factores a los cuales se enfrenta a diario la sociedad, es al desarrollo económico, basado en los recursos naturales que se pueden encontrar en la zona, dentro de los cuales, el oro es uno de los minerales más apetecidos en la naturaleza. A diario grandes industrias que realizan minería legal están tomando medidas con diferentes tecnologías para disminuir el impacto ambiental que recibe la tierra al momento de extraer los minerales.

La flotación de minerales en suspensiones acuosas es un proceso que consiste en la separación de partículas hidrofóbicas de partículas hidrofílicas de distinto origen por medio de burbujas de gas. La flotación es uno de los procesos más importantes para la recuperación de oro y materiales valiosos donde su principal restricción es la recuperación de partículas gruesas (Narango, 2012).

El municipio de California, ubicada en el departamento de Santander, perteneciente a la provincia de Soto Norte a 51 km de la ciudad de Bucaramanga pasando por los municipios de Matanza y Surata, se encuentra ubicado en una zona minera, en la que se ha desarrollado desde hace más de 460 años, la extracción de oro como una tradición, pero en estos momentos la recuperación del oro no se está llevando por el debido proceso de flotación.

Por ser zonas de alta sensibilidad ambiental, se busca realizar un beneficio de mineral sin el uso de la cianuración, sino llevarlo a un producto intermedio y luego exportarlo sin que el medio ambiente sufra un alto daño. Ese producto intermedio es el concentrado que se obtendrá mediante el proceso denominado Flotación Bulk, el cual requiere caracterizar y luego de llevarla a un

proceso de molienda se desarrollará su respectiva liberación y luego la flotación en celdas convencionales. Para encontrar las mejores variables operativas del proceso se realizará un diseño experimental con el cual se determinará la recuperación de oro correspondiente, variando el tiempo, consumo de colector y el pH.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Establecer variables operativas adecuadas para la flotación bulk de minerales polimetálicos de la Zona minera de California, Santander.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar química, física, microscópica y granulométricamente el mineral aurífero de la zona minera de California, Santander.
- Establecer y analizar variables operativas de % de liberación mineral, consumo de reactivos, ángulo de contacto interface mineral – colector, cinética de flotación y velocidad de agitación, del proceso de flotación bulk a nivel laboratorio.
- Proponer un flujograma de concentración de minerales auríferos mediante flotación bulk, con las mejores variables operativas y la mayor recuperación posible.

2. Marco Teórico

2.1 Flotación

A nivel industrial, la flotación es un proceso físico-químico que consiste en la separación de partículas hidrofóbicas de partículas hidrofílicas por medio de una burbuja de gas, es considerado un método selectivo basado en la “hidrofobicidad” ya que puede ser natural de una superficie de un mineral o inducida por medio de sustancias surfactantes. A nivel minero es considerado como un proceso muy complejo dado que incluye conceptos y estudio sobre la hidrodinámica y fisicoquímica de superficies (Florez, 2006).

2.3. Sulfuros Polimetálicos

Son considerados como los minerales más abundantes en la naturaleza especialmente en el país (Colombia) y por ello son minerales de mucho estudio, sin embargo, existen algunos minerales dóciles frente a la flotación y otros que son muy complejos a la hora de realizarse este proceso debido a las sales solubles que contiene el mineral como es el caso del cobre (Azañero Ortiz Á. , 2010).

2.4 Reactivos De Flotación

Los reactivos de flotación se dividen en:

- **Colectores:** Son compuestos orgánicos los cuales se absorben sobre las partículas, este proceso hace que se vuelvan hidrófobas. Son usados en el proceso de flotación y los colectores más usados son los aerofloats y los xantatos (usados para la flotación de sulfuros). Los colectores son muy importantes en los procesos de flotación de sulfuros porque sin ellos los sulfuros no se pueden pegar a las burbujas y al momento de subir las burbujas subirían sin los minerales y los sulfuros más valiosos se irían a las colas (Huacan Nina, 2015).
- **Espumantes:** En la flotación los espumantes actúan como agentes activos que se adicionan con función de: estabilizar la espuma, disminuir la tensión superficial del agua, mejorar la cinética de interacción burbuja-partícula y disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (Huacan Nina, 2015).
- **Modificadores de pH:** En el proceso de flotación el pH me indica el grado de alcalinidad (cantidad de cal que presenta el circuito de flotación) que presenta la pulpa, a mayor cantidad de cal la pulpa es más alcalina y a menor cantidad de cal la pulpa es menos alcalina. Si el pH es 7 indica neutro y dicho pH corresponde al agua pura. Si el pH indica un valor de 0 a 6 significa que la pulpa presenta baja alcalinidad y si indica un valor de 8 a 14 significa que la pulpa presenta alta alcalinidad. Cada sulfuro posee su propio pH en la flotación en el cual se puede flotar mejor, pero esta propiedad puede variar según el mineral y la procedencia de aquel. Este valor de pH se mide con un potenciómetro. Para una flotación óptima se debe regular el pH, la cal por ejemplo es un reactivo que ayuda a regular

el pH porque deprime las gangas y precipita en el agua las sales disueltas; esto ayuda a dar a cada pulpa el pH más adecuado (Huacan Nina, 2015).

2.5 Antecedentes

- A lo largo de los años la flotación del oro y minerales auríferos ha sido objeto de estudio por diferentes investigadores, en los cuales se encuentran Allan & Woodcock en el año 2001 lo cual hicieron sustentar a fondo la misma afirmación que tenía TEAGUE ET AL en el año 1999.

ALAN & WOODCOCK: En sus trabajos realizados sobre la flotación de oro utilizaron oro refinado de alta pureza y aleaciones de oro y plata. Además, afirman: “La mineralogía de los minerales auríferos y de la ganga acompañante, el tipo de perfil de liberación de los minerales auríferos después de que la mena se somete a procesos de reducción de tamaño y el tamaño de las partículas de oro, constituyen los factores más importantes para determinar el mejor método de procesamiento de un mineral aurífero” (Narango, 2012).

- El ditiofosfato es el colector más conveniente, para que se pueda utilizar en la obtención de concentrados con elevadas recuperaciones de oro, cobre y bajas recuperaciones de arsénico según publica L. CHACON, F. RUIZ y R. ZAPICO en su artículo publicado en el 2005 en una revista metalúrgica en la ciudad de Madrid, España (Chacon, Ruiz, & Zapico, 2005).
- En la flotación de minerales los procesos para la “recuperación de concentrados de oro a metales básicos” o para la “producción de concentrados bulk para otros procesos de recuperación de oro (pirometalurgia o hidrometalurgia), son procesos importantes para concentrar el oro y reducir los costos (Adams, 2016).

- DOMINIC MIHOVILOVIC en 2006 afirmó que el proceso de flotación se “recomienda en el tratamiento de minerales a distintas granulometrías, porque permite la recuperación de minerales a tamaños relativamente gruesos, reduciendo costos en trituración, molienda y concentración, y disminuyendo pérdidas en los finos que generalmente se forman en las operaciones de reducción de tamaños” (Azañero Ortiz, 2016).
- En la flotación de los sulfuros que contiene sulfuros de metales básicos y minerales de oro, el oro generalmente se asocia con minerales como la pirita, arsenopirita, cobre al tamaño de micras y por ello este tipo de flotación presenta muchos desafíos al realizarse el proceso (Adams, 2016).

3. Metodología

La metodología que se ha seguido en el trabajo consistió en una investigación experimental, que incluyó muestreo en campo del mineral, caracterización, liberación y preparación mecánica del mineral, pruebas de flotación y análisis de resultados.

3.1 Muestreo del mineral

El mineral con el cual se desarrolló este proyecto fue obtenido de una zona minera la cual se encuentra ubicada en el municipio de California Santander al cual se le realizó un muestreo de campo, dicho muestreo se realizó bajo el método Gy que consiste en generar una geometría del

depósito y luego establecer puntos donde se obtiene muestras hasta completar 50 kg para las pruebas y caracterización.

3.2 Caracterización del mineral

Una vez obtenida la muestra del mineral, la cual fue facilitada por los mineros y geólogos de la mina, se le realizó una caracterización al mineral.

Se le realizó un análisis granulométrico el cual consistía en pasar el mineral obtenido a diferentes tipos de mallas (malla 14, 16, 18, 20, 30, 40, 60, 100 y 120) para posteriormente realizarse la prueba de liberación de minerales (la cual se realizaron 2 pruebas para cada tipo de malla).

También se le realizó la caracterización al mineral a través del análisis de Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) y Difracción de rayos X (DRX).

El estudio de la caracterización por medio de la microscopía electrónica de barrido se realizó con el fin de verificar el estado de los minerales metálicos de interés (Au, Ag).

3.3 Liberación y preparación del mineral

A nivel de laboratorio se realizó la liberación del mineral por diversos tamaños de partícula, y luego mediante trituración y molienda se realizó la preparación mecánica del mineral para las pruebas.

Para la prueba de molienda se realiza el siguiente procedimiento:

- Preparar el mineral 100% pasante Malla #10 a la cual se le realiza su respectivo análisis granulométrico.
- Alistar el molino de bolas de acuerdo a los métodos estándares de molienda, (Molino 12" x 12") a 70 rpm, carga de 20 kg en material chancador.
- Preparar 1 Kg de mineral en una pulpa al 70% de sólidos y se carga al molino.
- Moler el mineral en tiempos de 2, 5, 7, 10, 15, 18, 20, 25 y 30 minutos cuantificando el porcentaje de sólidos que pasen la malla #200, realizando una experiencia por tiempo.

3.4 Diseño experimental

Para el desarrollo del diseño experimental de las pruebas se realizó un diseño factorial 2^3 , para el cual se realizó una variación de las variables: porcentaje de sólidos, granulometría y el consumo de colector.

El diseño de las pruebas para poder analizar el proceso de Flotación bulk, se realizaron 8 pruebas, para determinar el porcentaje de recuperación de oro y de plata.

Luego se realizó un gráfico comparando el porcentaje de recuperación de oro y plata a través de las 8 pruebas para posteriormente realizar el análisis y la discusión correspondiente.

3.5 Análisis de Resultados

Al finalizar las pruebas realizadas en el diseño experimental y al realizar el cálculo correspondiente de recuperación de oro y plata, mediante la ayuda del programa statgraphics se ingresan los datos obtenidos, el programa le arroja unas tablas estadísticas correspondientes a la recuperación de

oro y plata, al momento de variar el porcentaje de sólidos, la granulometría del mineral y el consumo del reactivo colector.

4. Resultados

4.1 Caracterización del mineral

Una vez obtenido el mineral, el cual fue proporcionado por la zona minera ubicada en el municipio de California Santander se puede observar en la figura 1, una asociación pirita-calcopirita en contacto con agregados de moscovita alterando a caolinita.

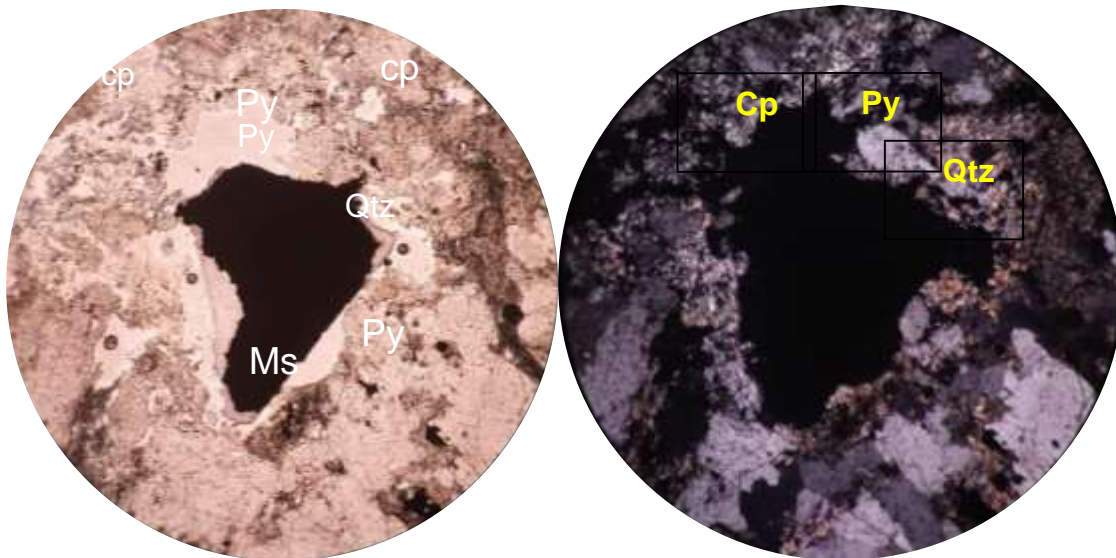


Figura 1. Sección delgada, muestra del mineral.

Al realizar una muestra en diferentes puntos, se puede observar minerales de pirita, cuarzo, silicatos, caolinita, sulfuros de cobre y mineral de titanio, como podemos ver en la figura 2.

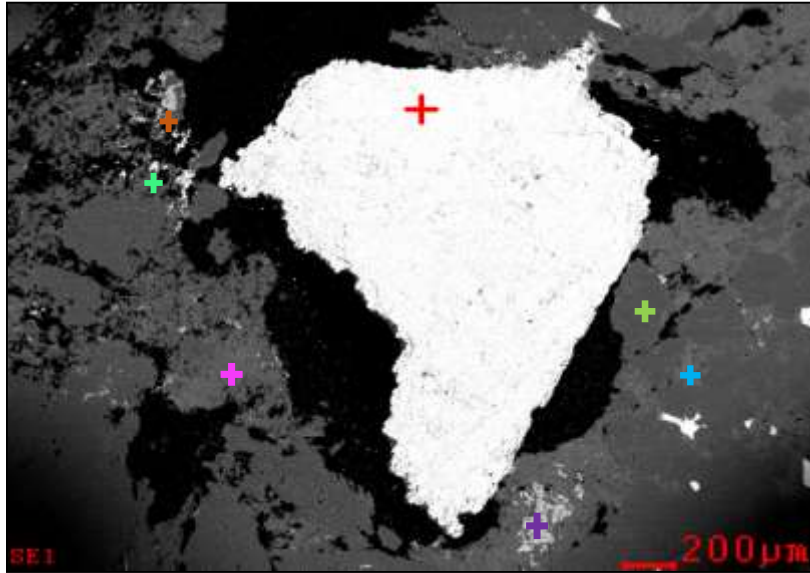


Figura 2. Muestra del mineral evaluado en diferentes puntos

A partir de los diversos SEM obtenidos se ratifica la presencia de oro refractario de pirita auroargentífera asociada a telurios metálicos, y oro encapsulado dentro de la pirita y los sulfuros de cobre, se pudo observar que las finas partículas que contienen los minerales de interés asociados a telurios e incluidos en pirita refractaria, estos minerales presentan tamaños entre 2-7 micrómetros. En las imágenes 1 y 2 se muestran tres de las muestras que fueron analizadas en el microscopio electrónico de barrido y a las cuales se les aplicó una cubierta de carbono. Así mismo en las figuras 3, 4, 5, 6 y 7 se puede observar los resultados obtenidos en la microscopía electrónica de barrido.

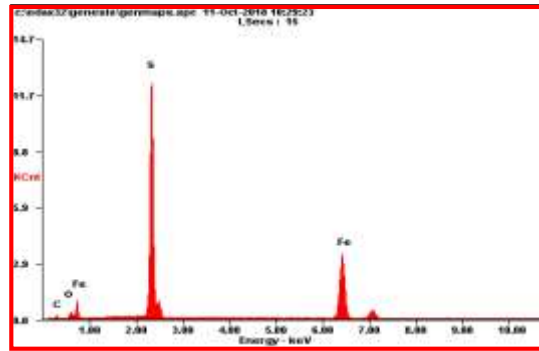


Figura 3. Análisis EDS para la pirita

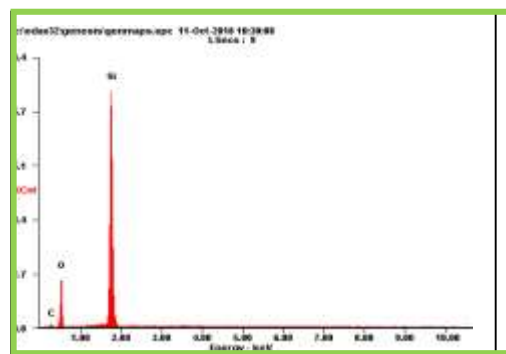


Figura 4. Análisis EDS para el cuarzo

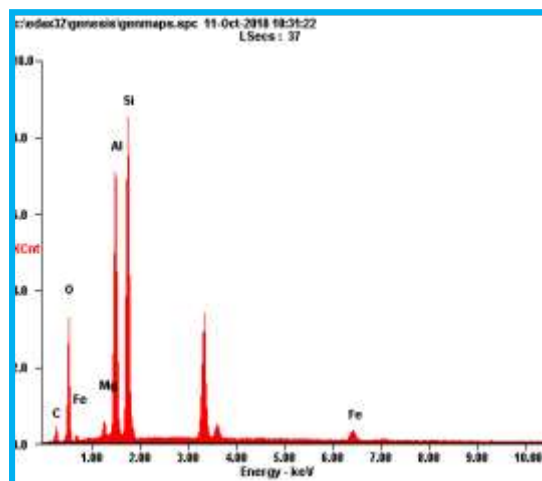


Figura 5. Análisis EDS para los aluminosilicatos

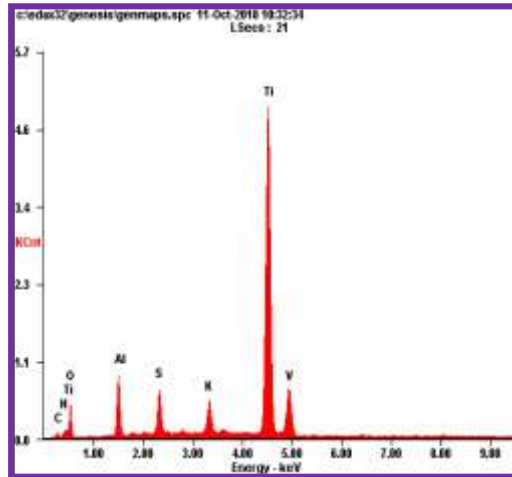


Figura 6. Análisis EDS para la caolinita

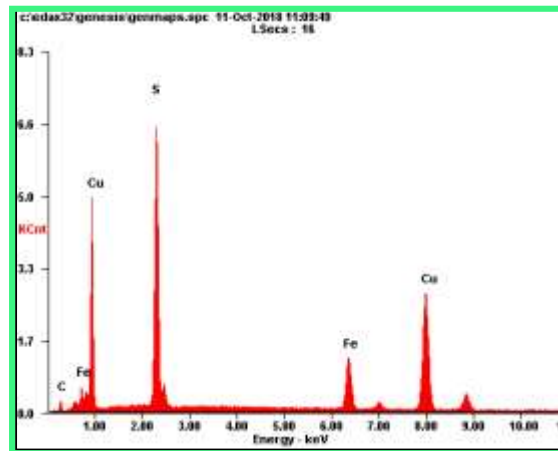


Figura 7. Análisis EDS para el sulfuro de cobre.

4.2 Liberación de minerales

La determinación del grado de liberación no sólo es indispensable como investigación previa al diseño de cualquier tipo de proceso de tratamiento, sino que también resulta muy valiosa para evaluar el rendimiento de los equipos de molienda o de clasificación y para incrementar la eficiencia de plantas en operación.

El análisis realizado, consistió en realizar la separación y lavado de minerales a distintos tamaños de malla, empezando en la #14 hasta la #120. Los resultados obtenidos al duplicado se presentan a continuación. Ver figura 8 y tablas 1 a 9. Las abreviaturas utilizadas para los minerales identificados se presentan a continuación:

Qtz (cuarzo), Py (pirita), Mag (magnetita), Ftp (feldespatos), Alu (alunita).



Malla 14 - 1



Malla 14 - 2



Malla 16 - 1



Malla 16 - 2



Malla 20 - 1



Malla 20 - 2



Malla 30 - 1



Malla 30 - 2



Malla 40 - 1

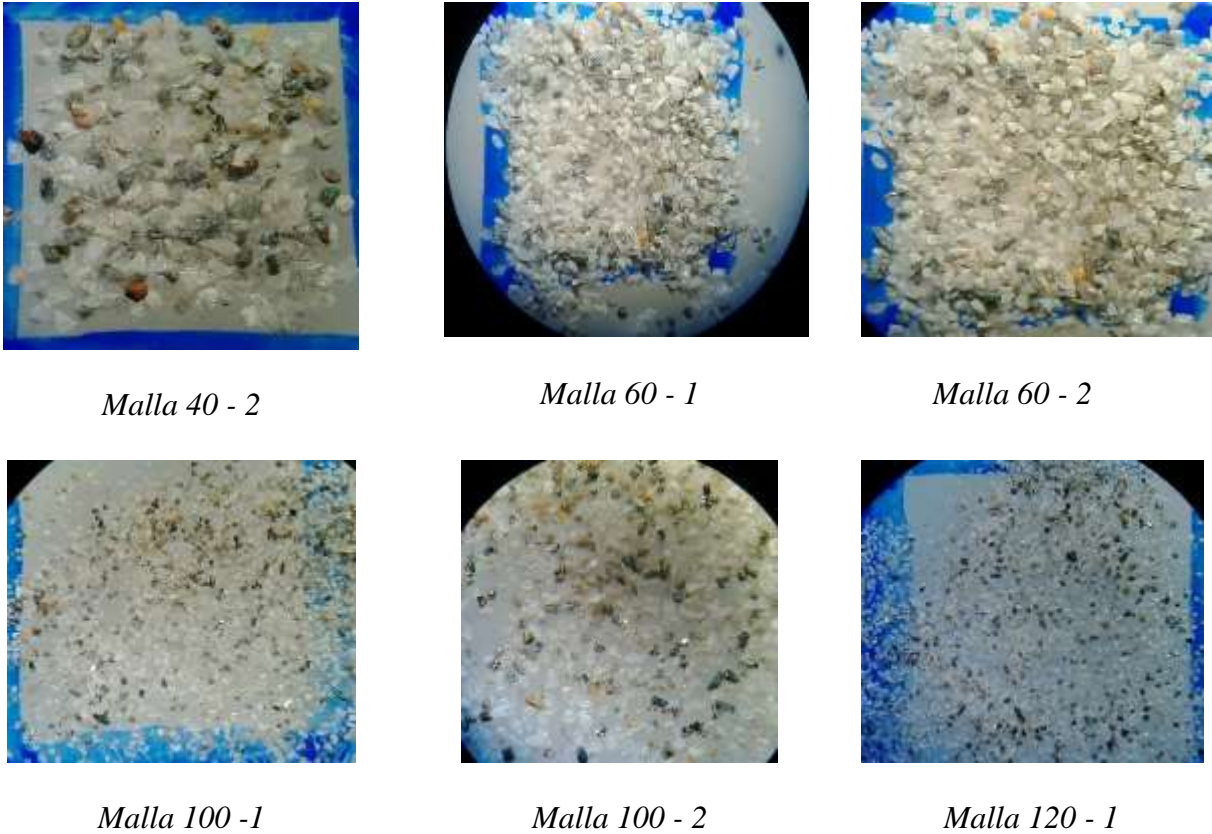


Figura 8. Mosaico de resultados de liberación de minerales.

Los resultados obtenidos en las pruebas de liberación de minerales se presentan en las tablas 1 a 9:

Tabla 1.

Resultados liberación del mineral para malla 14.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	20	25
Ftp	4	10
Py	0	0
Alu	5	0
Mag	0	4

Tabla 2.

Resultados liberación del mineral para malla 16.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	25	20
Ftp	10	8
Py	0	0
Alu	5	0
Mag	0	0

Tabla 3.

Resultados liberación del mineral para malla 18.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	25	25
Ftp	15	10
Py	0	0
Alu	10	2
Mag	0	0

Tabla 4.

Resultados liberación del mineral para malla 20.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	30	30
Ftp	15	12
Py	0	0
Alu	10	2
Mag	0	0

Tabla 5.

Resultados liberación del mineral para malla 30.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	65	65
Ftp	15	15
Py	0	0
Alu	10	5
Mag	0	0

Tabla 6.

Resultados liberación del mineral para malla 40.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	70	68
Ftp	15	15
Py	0	0
Alu	8	10
Mag	0	0

Tabla 7.

Resultados liberación del mineral para malla 60.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	80	85
Ftp	45	60
Py	35	5
Alu	3	60
Mag	0	85

Tabla 8.

Resultados liberación del mineral para malla 100.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	95	97
Ftp	95	95
Py	95	95
Alu	90	90
Mag	90	90

Tabla 9.

Resultados liberación del mineral para malla 120.

Mineral	Porcentaje de partículas libres %	
	Prueba 1	Prueba 2
Qtz	98	98
Ftp	95	95
Py	95	95
Alu	90	90
Mag	90	90

Una vez se tiene una visión global del comportamiento mecánico de los minerales presentes en la mena del yacimiento, se encontró que a medida que se tiene un mineral de tamaño más fino y en efecto mayor liberación asociada, se generan superficies mayores de metales de interés, en este caso oro, plata y cobre mayores, proceso que favorece su liberación de las rocas en los que se encuentran encapsulados. De acuerdo al estudio mineralógico que se desarrolló, se trata de encapsulados de la bornita y la pirita que atrapan los granos finos de oro. Por ello, que a la malla 120 se encuentra el 95% de pirita libre y el 5% restante aún sigue sin liberarse formando su

estructura inicial, de esa manera al asociar el oro a la pirita, se concluye que el oro no ha sido liberado a ese tamaño.

4.3 Diseño experimental aplicado a la flotacion bulk

La flotación bulk se realiza al mineral con el objeto de flotar toda la parte valiosa en un mismo concentrado. Se utilizaron para estas pruebas un sistema experimental 2³, variando el porcentaje de sólidos, la granulometría y el consumo de colector.

Los parámetros utilizados fueron:

Porcentaje en sólidos: 30 y 35%
Granulometría: 65% <200M y 80%< 100M
Colector: Xantato isopropílico de Sodio Z-11
Consumo de colector: 21 g/T y 35 g/T
Espumante: MIBC:
Consumo del espumante: 17 g/T
pH: 9,5 a 10,5

El diseño de las pruebas para el análisis de la flotación en Bulk, se realiza en base a 8 pruebas tal como se presentan en la tabla 1j0.

Tabla 10.

Diseño de pruebas de flotación bulk.

PRUEBA	% SÓLIDOS		GRANULOMETRÍA		CONSUMO COLECTOR	
	30%	35%	65% <200#	80% <100#	3 GOTAS	5 GOTAS
1	X		X		X	
2	X		X			X
3	X			X	X	
4	X			X		X
5		X	X		X	
6		X	X			X
7		X		X	X	
8		X		X		X

En las tablas 11 y 12 se presentan los resultados de las diferentes pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para el Oro y la Plata.

Tabla 11.

Diseño de pruebas para la recuperación de Oro.

PRUEBA	Alimento	Ley de cabeza	Concentrado	Ley de concentrado	Colas	Ley de colas	Recuperación Au
	Kg	g/T	Kg	g/T	Kg	g/T	%
1	1	4.58	0.22	18	0.78	3.22	36%
2	1	4.58	0.26	19.26	0.74	2.80	46%
3	1	4.58	0.28	15	0.72	3.20	38%
4	1	4.58	0.26	16.3	0.74	3.16	39%
5	1	4.58	0.21	29.35	0.79	2.21	56%
6	1	4.58	0.21	35.6	0.79	1.61	68%
7	1	4.58	0.19	31.41	0.81	2.28	54%

PRUEBA	Alimento	Ley de cabeza	Concentrado	Ley de concentrado	Colas	Ley de colas	Recuperación Au
8	1	4.58	0.19	30.27	0.81	2.37	52%

Tabla 12.

Diseño de pruebas para la recuperación de Plata

PRUEBA	Alimento	Ley de cabeza	Concentrado	Ley de concentrado	Colas	Ley de colas	Recuperación Ag
	Kg	g/T	Kg	g/T	Kg	g/T	%
1	1	11	0.22	76.66	0.78	4.78	60%
2	1	11	0.26	59.11	0.74	5.52	55%
3	1	11	0.28	47.11	0.72	6.53	47%
4	1	11	0.26	68	0.74	4.51	63%
5	1	11	0.21	110	0.79	2.09	83%
6	1	11	0.21	110.12	0.79	2.08	83%
7	1	11	0.19	61.7	0.81	6.91	42%
8	1	11	0.19	108.7	0.81	3.11	74%

La figura comparativa 9, nos presenta a primera vista que las pruebas 6 y 5 arrojan las condiciones más favorables para este tipo de flotación, es decir con las variables: 35% en sólidos y una granulometría 65% pasante malla 200. Sin embargo, se ha realizado un análisis estadístico más puntual, para cada una de las variables involucradas, de ese modo, se encuentra que:

- A medida que aumenta el % de sólidos desde 30 a 35% se obtiene mayor recuperación de especies: para el Au aumenta un 18% y para la plata 13%.

- A medida que la granulometría fue mayor, se obtuvo un aumento considerable de recuperación: el oro aumenta un 5% y la plata un 14%

- A medida que agregamos mayor contenido de reactivo colector, mayor recuperación se alcanza, así al pasar desde 21 g/t a 35gpT de colector aumentamos la recuperación de oro y plata en 5 y 11% respectivamente.

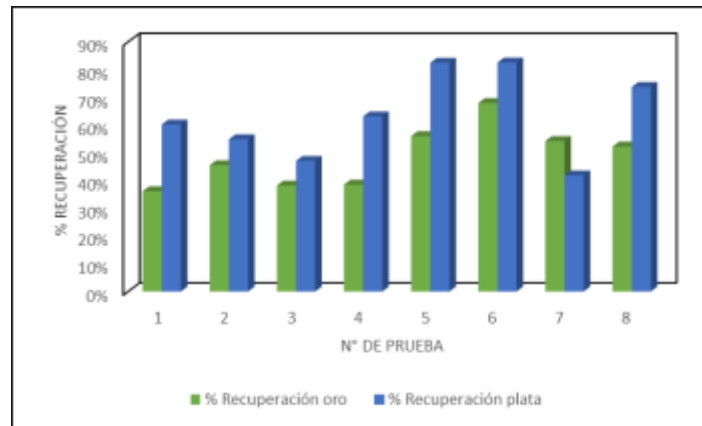


Figura 9. Comparación entre % de recuperación en las diferentes pruebas de flotación bulk.

4.4 Aplicación del programa estadístico Statgraphics

El análisis estadístico a partir de las pruebas de flotación bulk se muestran en las tablas 13, 14 y 15.

Tabla 13.

Análisis estadístico del efecto del % de sólidos en flotación bulk.

30%		35%	
Resumen Estadístico para Rec Au		Resumen Estadístico para Rec Au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	39,5575	Promedio	57,63
Mediana	38,355	Mediana	55,14
Desviación Estándar	4,12959	Desviación Estándar	7,05492
Coefficiente de Variación	10,4395%	Coefficiente de Variación	12,2418%
Mínimo	36,0	Mínimo	52,28
Máximo	45,52	Máximo	67,96
Rango	9,52	Rango	15,68
Sesgo Estandarizado	1,26184	Sesgo Estandarizado	1,40519
Curtosis Estandarizada	1,1743	Curtosis Estandarizada	1,2691
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	56,3425	Promedio	70,18
Mediana	57,56	Mediana	78,13
Desviación Estándar	7,03959	Desviación Estándar	19,3224
Coefficiente de Variación	12,4943%	Coefficiente de Variación	27,5326%
Mínimo	47,11	Mínimo	41,87
Máximo	63,14	Máximo	82,59
Rango	16,03	Rango	40,72
Sesgo Estandarizado	-0,650974	Sesgo Estandarizado	-1,42322
Curtosis Estandarizada	-0,173096	Curtosis Estandarizada	1,21747

Tabla 14.

Análisis estadístico del efecto de la granulometría en flotación bulk.

65% < 200#		80% <100#	
Resumen Estadístico para Rec_au		Resumen Estadístico para Rec_au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	51,3775	Promedio	45,81
Mediana	50,775	Mediana	45,405
Desviación Estándar	13,7526	Desviación Estándar	8,64696
Coefficiente de Variación	26,7678%	Coefficiente de Variación	18,8757%
Mínimo	36,0	Mínimo	38,18
Máximo	67,96	Máximo	54,25
Rango	31,96	Rango	16,07
Sesgo Estandarizado	0,172292	Sesgo Estandarizado	0,0353846
Curtosis Estandarizada	-0,445071	Curtosis Estandarizada	-2,34096
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	70,0525	Promedio	56,47
Mediana	71,365	Mediana	55,125
Desviación Estándar	14,5889	Desviación Estándar	14,6538
Coefficiente de Variación	20,8257%	Coefficiente de Variación	25,9497%
Mínimo	54,89	Mínimo	41,87
Máximo	82,59	Máximo	73,76
Rango	27,7	Rango	31,89
Sesgo Estandarizado	-0,0936464	Sesgo Estandarizado	0,265244
Curtosis Estandarizada	-2,18051	Curtosis Estandarizada	-1,24804

Tabla 15.

Análisis estadístico del efecto del consumo de reactivo en flotación bulk.

21 g/t		35 g/t	
Resumen Estadístico para Rec_au		Resumen Estadístico para Rec_au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	46,115	Promedio	51,0725
Mediana	46,215	Mediana	48,9
Desviación Estándar	10,4843	Desviación Estándar	12,5803
Coefficiente de Variación	22,7352%	Coefficiente de Variación	24,6322%
Mínimo	36,0	Mínimo	38,53
Máximo	56,03	Máximo	67,96
Rango	20,03	Rango	29,43
Sesgo Estandarizado	-0,0101283	Sesgo Estandarizado	0,730943
Curtosis Estandarizada	-2,30415	Curtosis Estandarizada	0,30375
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	57,9275	Promedio	68,595
Mediana	53,67	Mediana	68,45
Desviación Estándar	18,1105	Desviación Estándar	12,1123
Coefficiente de Variación	31,2641%	Coefficiente de Variación	17,6577%
Mínimo	41,87	Mínimo	54,89
Máximo	82,5	Máximo	82,59
Rango	40,63	Rango	27,7
Sesgo Estandarizado	0,86534	Sesgo Estandarizado	0,0436073
Curtosis Estandarizada	0,115099	Curtosis Estandarizada	-0,754342

Luego de analizar detenidamente cada una de las tablas que arrojó el programa se obtienen que las recuperaciones en la flotación bulk, es mejorada principalmente con el aumento del % de sólidos, un menor tamaño de mineral y un mayor contenido de reactivo; se encuentra un máximo de recuperación de oro del 68% y de la plata de 82,6%; aunque son valores buenos, han sido los mejores resultados obtenidos en el laboratorio, por lo cual es recomendable realizar una flotación selectiva en el cual se logre una recuperación más efectiva para el mineral trabajado.

5. Flujograma de flotación bulk

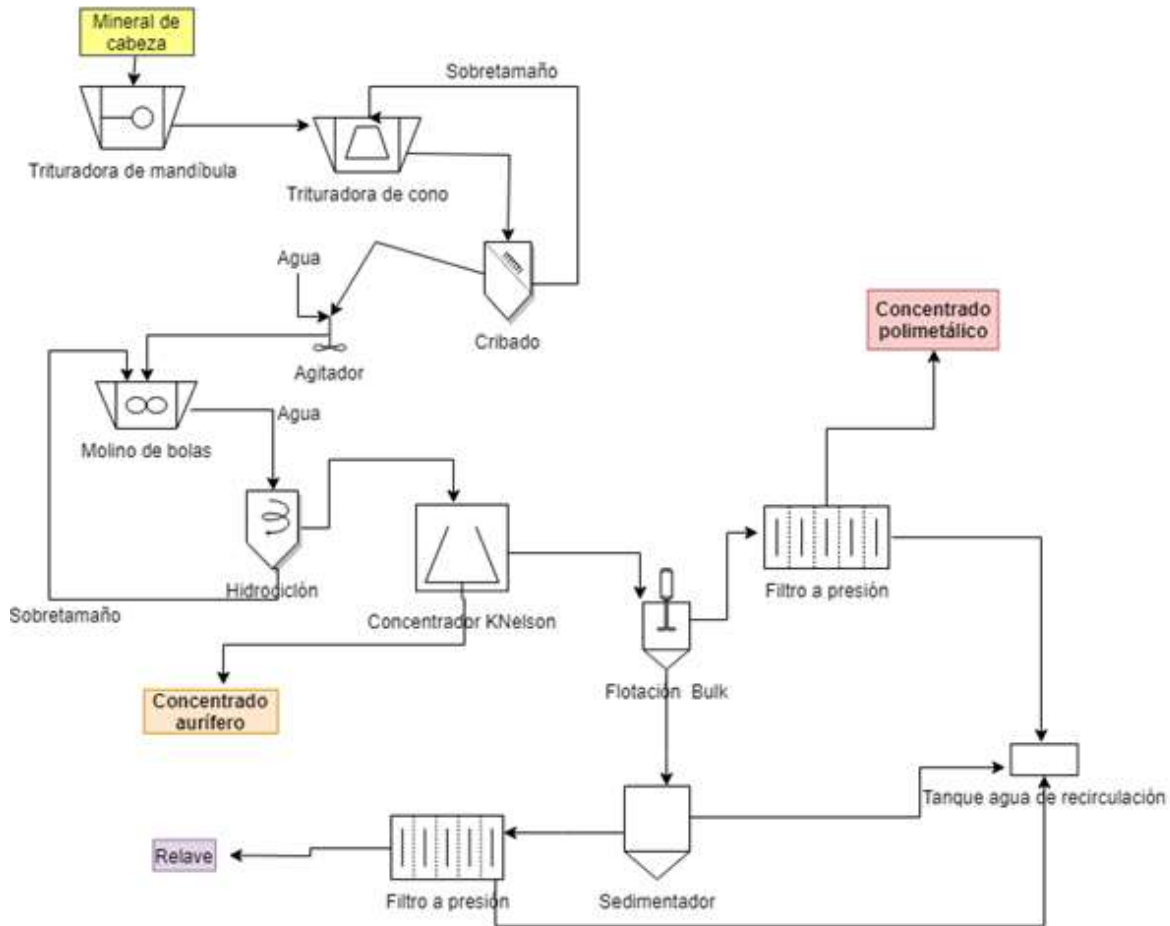


Figura 10. Flujograma de flotación bulk de minerales polimetálicos de la zona minera de California Santander

El flujograma mostrado en la figura 10, presenta los pasos de la concentración de minerales polimetálicos de California Santander.

Esto consta de preparación mecánica mediante trituradora de mandíbulas y trituradora de cono para entregar mineral a tamaños menores de ¼ pulgadas. La liberación del mineral se alcanza con

una etapa de molienda en circuito cerrado con un hidrociclón hasta lograr una granulometría de 65% - 200 mallas, la cual es el alimento de la flotación bulk.

Esta flotación colectiva se realiza a 35% de sólidos y con un consumo de colector de 35 g/Tn y pH natural.

La ley de oro en el concentrado alcanzado será de 35,6 g/Tn y una recuperación máxima del 68%.

Posteriormente el concentrado será sometido a espesamiento y filtrado para recuperar el agua y recircularlo.

6. Conclusiones

La muestra del mineral aurífero de la zona minera de California, contiene diversos componentes valiosos dentro de ellos el oro, que en general está asociado a sulfuros y telururos en tamaños de 2-7 micras.

La recuperación obtenida en la flotación bulk alcanza aprox.68% de oro y 83% de plata lo cual es bajo para productos concentrados.

Esto se debe a que los componentes oro y plata se encuentran muy finos.

Las etapas de procesamiento del mineral llevadas a un flujograma son:

Extracción de mina, trituración, cribado, molienda, clasificación, flotación bulk y separación sólido-líquido.

Se recomienda por los bajos porcentajes de recuperación obtenidos y las características mineralógicas del depósito mineral la flotación selectiva, para buscar obtener concentrado de pirita aurífera y concentrado de cobre.

Referencias Bibliográficas

Adams, M. (2016). *Gold ore processing. 2 ed. Elsevier Science.*

Álvarez-Rodríguez, Menéndez-Aguado, R. D., Coello-Velázquez,. (2013). *raw materials evaluation in a silica processing plant to increase the energy efficiency in grindindg process* (vol. 80).

Arenas, J. E. (2004). *Litología y Petrología de las Metamorfitas Carbonatadas y Metasedimentitas Asociadas de la Formación Silgará, Faja Noroeste de Mutiscua (Macizo de Santander.* Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.

Azañero Ortiz, Á. (2010). Flotación de minerales polimetálicos sulfurados de Pb, Cu y Zn. *Revista del instituto de investigación. Perú. .*

Azañero Ortiz, Á. (2016). Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la región Casma. *Revista del instituto de investigación. Perú. Vol. 19, 171-177.*

B.A. Wills & T.J. Napier – Munn. (2006). *Mineral Processing Technology.*

Blanc, E. (1975). *Tecnología de los Aparatos de Fragmentación y de Clasificación Dimensional.* Madrid: Laureano Fueyo.

Bond-F-C. (1961). *Crushing-and-Grinding-Calculations.*

Bond-F-C. (1961). *Grinding calculations.*

Bustamante, Oswaldo; Gaviria, Ana. (2008). *Concentración de minerales.* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas, Medellin.

Chacon, L., Ruiz, F., & Zapico, R. (2005). Concentración por flotación de menas de oro-cobre con bajas recuperaciones de arsénico. *Revista de Metalurgia. Madrid. Vol. Extr*, 390-394.

Emilio Leyva Ramírez, M. d. (Centro de Investigaciones Siderúrgica de 2009). *Estudio de la cinética de molienda de una mena de Cromita del yacimiento Albertina*. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, Centro de Investigaciones Siderúrgica, Holguín.

Florez, J. (2006). *Flotación de Minerales*. Bolivia: Universidad Autónoma “Tomas Frías”.

Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. . *Geological Survey Professional Paper*, 44-49.

Huacan Nina, Á. (18 de febrero de 2015). *Flotación bulk*. Obtenido de http://www.academia.edu/4229900/K_Recuperacion_de_todas_las_especies_valiosas_or_o_plomo_plata_zinc_cobre_etc._en_un_solo_producto_llamado_Concentrado_Bulk._RE_ACTIVOS_DE_FLOTACION_BULON

Industrias, 7. (2010). *Molienda*. Universidad de Buenos Aires, Facultad de ingeniería, Buenos Aires.

J. M. Coulson, J. (s.f.). *Ingeniería Química 2: Unidades SI, operaciones básicas*, (Vol. 1).

King, R. (1979). A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding. *Journal mineral process*, 6, 206-207.

Mantilla, F.L.C., Bissig, T., Valencia, V., and Craig, H. (2013). The magmatic history of the Vetas-california mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera. 45, 235-249.

Mantilla, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., Hart, C. (2011). Nuevas Evidencias Sobre el Magmatismo Miocénico en el Distrito Minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33(1).

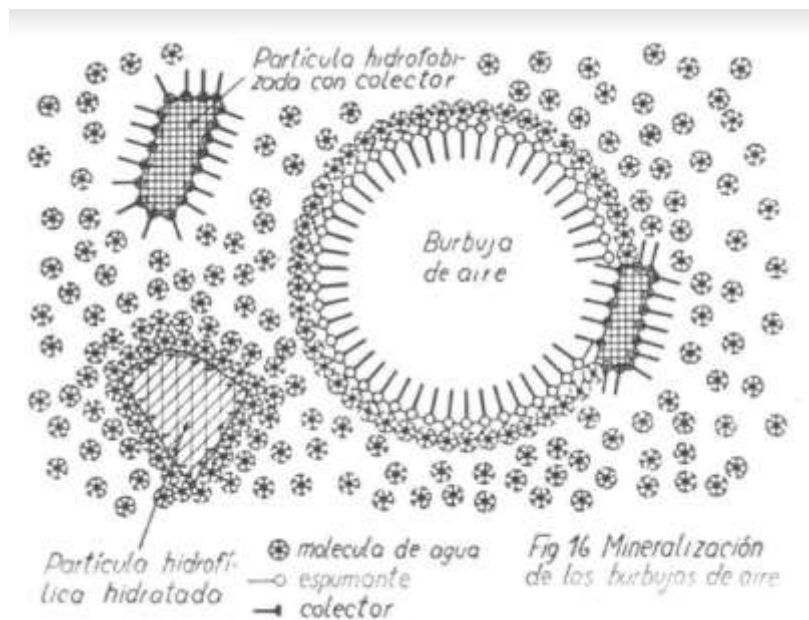
Mendoza, H. et al. (1979). Geología y Geoquímica del Área de California, Santander. *Boletín Geológico Ingeominas*, 22, 3-52.

- Menéndez, J.M., Dzioba, B.R. y Coello, A.L. (s.f.). *Determination of work index in a common laboratory mill* (Vol. 22). Metall. Proc. . Recuperado el 2018
- Narango, D. (2012). *Flotación directa de oro nativo grueso, como sustituto de la amalgamación tradicional*. Universidad Nacional de Colombia. .
- Ortiz Edgar; Tirado Ronald. (2005). *Diseño y construcción de una trituradora excentrica de mandíbulas*. Universidad Industrial de Santander, Ingeniería mecánica, Bucaramanga.
- Royero G., J. M. y Clavijo T., J. (1997). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander. *Ingeominas*.
- Tamaños, T. 4. (s.f.). *Operaciones de preparación*. Recuperado el 2018, de http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5547/mod_resource/content/1/Tema_4_-_Molienda_I_.pdf
- Ureña Cindy; Zuluaga Carlos. (2011). *Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas – Santander*. Investigación, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- Usach. (2003). *CAPÍTULO 12: PROCESAMIENTO DE MINERALES*. Ingeniería Metalúrgica , Universidad de Santiago de Chile.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., JARAMILLO, C., y RESTREPO. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 y H-1, H3. *Ingeominas Boletín geológico XXI., 1-3, 1-132*.

Apéndices

Apéndice A. Flotación de minerales

Figura 11. Mecanismo de flotación de minerales.



ELEMENTOS DE LA FLOTACIÓN

Fase sólida: El mineral es sólido con estructura cristalina. Se ve afectada por el carácter de la superficie creada, las imperfecciones de la red y los contaminantes presentes provenientes de otras fases.

Fase líquida: Agua (46% enlaces covalentes, 54% enlace iónico). Es importante conocer la dureza del agua, para que los contaminantes no afecten el proceso.

Los átomos de hidrógeno y de oxígeno, forman un ángulo de $109^{\circ} 30''$ lo cual causa una distribución asimétrica de cargas eléctricas dentro de la molécula del agua, formando entre si un dipolo otorgándole propiedades polares. Esta misma polaridad, es la causa de que la hidratación de los iones en soluciones acuosas, de modo que entre mayor es la carga del ion y menor su tamaño mayor es su hidratación.

Fase gaseosa: Aire (78,1% N_2 , 20,96% O_2 , 0,04% CO_2). Sus funciones son influir químicamente sobre el proceso de flotación, y ser el medio de transporte de las partículas de mineral. El aire puede ser inyectado mecánica o hidráulicamente al sistema; en este punto, se hace necesario el estudio de la solubilidad de los gases, la cual depende de su presión.

SELECCIÓN DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Xantato isopropilico de sodio: Este xantato debido a su elevado poder colector se utiliza en la flotación de minerales complejos de plomo-zinc y cobre-hierro en los cuales los principales minerales sulfurados con calcopirita, calcocita, energita, galena,pirita y pirrotita. Otra de sus aplicaciones incluye la concentración de cobre nativo, plata, oro y los sulfuros de hierro que contienen cobalto o níquel, así como la recuperación de piritas de hierro. Los Xantatos no son espumantes y por lo tanto pueden emplearse en cualquier proporción necesaria, sin peligro de producir espumacion excesiva. Esto hace posible que, mediante el uso de agentes espumantes no colectores en combinación con los xantatos, se logre un control altamente flexible y separado de la acción colectora y espumante, lo cual es una gran ventaja para mantener las condiciones adecuadas de flotación, durante los cambios de mineral. Los xantatos son soluciones acididad con un pH inferior a 6.0. La preparación de diluciones para su dosificación es recomendable por cuanto al agregarse resulta más exacto y un mejor de control de la dosificación del reactivo.

Xantato amílico de potasio: Este xantato, es muy empleado generalmente en aquellas operaciones de flotación que requieren el más alto grado de poder colector. Se usa en flotación de minerales sulfurosos de cobre, plomo, zinc, níquel, cobalto, etc. Colector típico para la flotación de sulfurosos manchados o minerales oxidados de cobre y plomo, se aplica con especial éxito en la flotación de la pirita que contiene oro.

Ditiofosfato AR-G431: Es un promotor excelente para plata, combina un buen poder colector con buena selectividad contra los sulfuros de hierro. Posee al igual que los otros Ditiofosfatos una considerable selectividad con respecto a la pirita en circuito alcalino. Este reactivo es especialmente útil en la flotación de calcopirita en presencia de pirita cuando se desea su selectividad. El ditiofosfato AR-G431 es un colector especialmente para menas de plomo y plata. Este reactivo es usado en la flotación de plata y para incrementar la recuperación de cobre como subproducto y se aplica directamente.

Apéndice B. Ángulo de contacto entre superficie mineral y colector

En los sistemas bifásicos como lo son: solido-liquido, solido-gas o liquido-gas, una característica importante es que en la interface tienen una gran cantidad de enlaces rotos, estos producen una actividad química superficial

Si en un punto se tienen dos fases α y β y una interface M, entre las dos fases la energía libre G será:

$$dG = dG^{\alpha} + dG^{\beta} + dG^M$$

Se puede determinar para las fases α , β y para la interface M, propiedades termodinámicas, también es necesario observar la energía libre de cada fase y de la interface:

Para la fase α :

$$dG^{\alpha} = -S^{\alpha} dT + P^{\alpha} dV + \eta i^{\alpha} d\eta i$$

Para la fase β :

$$dG^{\beta} = -S^{\beta} dT + P^{\beta} dV + \eta i^{\beta} d\eta i$$

Para la interface M:

$$dG^M = -S^M dT + \gamma dA + \eta i^M d\eta i$$

Ahora teniendo la tensión superficial γ :

$$dG = dG^{\alpha} + dG^{\beta} + dG^M$$

$$dG = -S^{\alpha} dT + P^{\alpha} dV + \eta i^{\alpha} d\eta i + -S^{\beta} dT + P^{\beta} dV + \eta i^{\beta} d\eta i + -S^M dT + \gamma dA + \eta i^M d\eta i$$

Se toma como parámetro que la temperatura, e volumen y la composición sean fijos:

$$dG = \gamma dA$$

Por medio de la siguiente ecuación se puede relacionar la energía libre superficial y la tensión superficial, donde E y A son la energía libre y el área de la interface:

$$\gamma = \left[\frac{dG}{dA} \right]_{T,P,n}$$

γ : tensión superficial, dinas/cm

G: energía libre, ergios/cm²

A: área, cm²

Las siguientes ecuaciones se dan para la adhesión partícula- burbuja de aire, el primer caso es cuando la partícula y la burbuja están separadas y el segundo caso es cuando la burbuja y la partícula están unidas:

$$G_1^S = \gamma^{LG} + \gamma^{SL}$$

$$G_2^S = \gamma^{SG}$$

A continuación, se tiene la ecuación para la energía de adhesión:

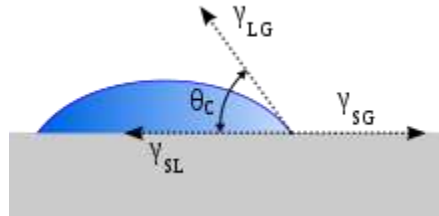
$$\Delta G_{adh}^0 = \gamma^{SG} - \gamma^{SL} - \gamma^{LG}$$

Solamente la tensión liquido-gas γ^{LG} es medible.

El ángulo de contacto es el parámetro que mide la mojabilidad o hidrofobicidad, y éste, es el ángulo formado entre la tangente a la gota y la superficie plana del sólido, a partir de del concepto de tensión superficial entre un líquido y un sólido y con la ecuación de Young se puede relacionar el ángulo de contacto (θ) de una gota de líquido (L) depositado sobre una superficie plana solida (S).

La siguiente imagen muestra el balance de energía superficial que existe entre la superficie, líquido y gas, si $\Delta G_{adh}^0 < 0$ la adhesión ocurre espontáneamente.

Figura 12. Angulo de contacto.



La siguiente ecuación muestra un equilibrio entre las fases: solida(s), líquida (L) y gaseosa(G):

$$\gamma^{SG} = \gamma^{SL} + \gamma^{LG} \cos\theta$$

Despejamos el ángulo para así establecer la relación que existe entre el ángulo de contacto y el mojado:

$$\cos\theta = \frac{\gamma^{SG} - \gamma^{SL}}{\gamma^{LG}}$$

Si $\gamma^{SG} - \gamma^{SL} = \gamma^{LG} \rightarrow \cos\theta = 1 \rightarrow \theta = 0^\circ$, ocurre humectación completa.

Si $\gamma^{SG} - \gamma^{SL} < \gamma^{LG} \rightarrow \cos\theta < 1 \rightarrow \theta > 0^\circ$, ocurre humectación parcial.

La tensión de adhesión o fuerza de adhesión ($\gamma^{SG} - \gamma^{SL}$) se muestra en la siguiente ecuación:

$$\gamma^{SG} - \gamma^{SL} = F$$

Teniendo en cuenta la ecuación de energía de adhesión, esta ecuación se determina en laboratorio:

$$\Delta G_{adh}^0 = \gamma^{SG} - \gamma^{SL} - \gamma^{LG} = \gamma^{LG} \cos\theta - \gamma^{LG}$$

Si $\theta = 0^\circ \rightarrow \cos\theta = 1, \Delta G_{adh}^0 = 0$

Si $\theta = 90^\circ \rightarrow \cos\theta = 0, -\Delta G_{adh}^0 = \gamma^{LG}$

Entonces, el fenómeno de adhesión partícula-burbuja es espontáneo cuando $\theta > 0^\circ$, y se dice que es un mineral hidrofóbico. Si $\theta = 0^\circ$, no existe adhesión partícula-burbuja, el mineral es

hidrofílico. De esta manera, la adhesión se vincula a un parámetro medible en el laboratorio; permite determinar las variables, tensiones superficiales.











La actividad de una superficie mineral con relación a los reactivos de flotación en el agua, depende de las fuerzas que actúan en la superficie. Para que ocurra la flotación de partículas con mayor densidad que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un sólido y un líquido se determina mediante la medida del ángulo formado por la superficie del sólido y la burbuja de gas, llamado ángulo de contacto θ .

Apéndice C. Liberación de minerales

El grado de liberación es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la molienda es capaz de obtener partículas minerales libres. La determinación del grado de liberación de un determinado mineral solo es posible mediante la utilización de estudios microscópicos, y dado que es un parámetro de importancia decisiva tal determinación debe basarse en una metodología técnica y científicamente bien fundamentada.

Una liberación perfecta sería aquella en que todos los granos de una determinada especie mineral quedaran completamente separados de las otras especies asociadas; ello es prácticamente imposible de obtener fundamentalmente debido a que los esfuerzos mecánicos rompen más fácilmente el “cuerpo” de una especie mineral dada que los bordes entre una especie y otra. Por otro lado, cuanto más compleja la composición mineralógica y la geometría de los intercrecimientos, más compleja será su respuesta a los esfuerzos mecánicos de ruptura y en consecuencia una determinada magnitud de molienda producirá tendencias de liberación muy diferenciadas entre una especie mineral y otra como bien señala “la liberación es función de la composición mineralógica de cada partícula en el material considerado y será diferente para cada una de las especies minerales presentes”. (King, 1979).

Figura 11. Grado de liberación de minerales.

Particula	A	B	C	D	E
	0.90x100= 90%	0.10x0= 0%			
	0.80x90= 72%		0.20x10= 2%		
			1x100= 100%		
	0.70x80= 56%	0.10x0= 0%		0.20x20= 4%	
	0.80x90= 72%			0.20x10= 2%	
			0.05x5= 0.25%		0.95x95= 90.25%
		0.02x0= 0%			0.98x100= 98%
	0.99x100= 99%	0.01x0= 0%			
	0.95x100= 95%	0.05x0= 0%			
	1x100= 100%				
Cálculo del grado de liberación para partículas mixtas A/B/C/D/E, de una malla dada					
	A	B	C	D	E
Suma de productos area x superficie expuesta	584	0	102.25	6	188.25
Máximo teórico de liberación(Total de partículas mixtas =30	1000	1000	1000	1000	1000
Grado de liberación (%)	58.4	0	10.225	0.6	18.825

A	Cuarzo
B	Pirita
C	Alunita
D	Magnetita
E	Feldespatos