

# CUADERNO FIRP S335-A

MODULO DE ENSEÑANZA EN FENOMENOS INTERFACIALES

*en español*

## FUNDAMENTOS de la FLOTACION

*Jean-Louis SALAGER y*

*Ana FORGIARINI de GUEDEZ*

LABORATORIO DE FORMULACION, INTERFASES  
REOLOGIA Y PROCESOS



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Mérida-Venezuela  
Versión # 3 (2007)

# FUNDAMENTOS DE LA FLOTACION

---

## *Contenido*

<b>1. FLOTACION: PRINCIPIOS Y ALCANCES</b>	<b>1</b>
<b>2. FENOMENOS INVOLUCRADOS</b>	<b>5</b>
2.1. Fenómenos interfaciales .....	5
2.2. Fenómenos hidrodinámicos .....	9
<b>3. ASPECTOS TECNOLOGICOS</b>	<b>11</b>
3.1. Celda por dispersión de aire .....	11
3.2. Celda de poca agitación .....	11
3.3. Asociaciones de celdas .....	12
<b>4. APLICACIONES: ALGUNOS CASOS PRACTICOS</b>	<b>14</b>
4.1. Separación de Cu, Pb y Zn de un sulfuro .....	14
4.2. Tratamiento de un mineral de fluorita/barita .....	15
4.3. Flotación de pegmatita .....	15
<b>5. INVESTIGACIONES EN FISICOQUIMICA INTERFACIAL</b>	<b>17</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>18</b>

## 1. LA FLOTACION: PRINCIPIOS Y ALCANCES

Este cuaderno FIRP pretende describir brevemente los principios de un método de separación llamado **flotación**, el cual es utilizado ampliamente en el enriquecimiento de minerales y otros procesos de separación. Este método involucra fenómenos variados entre los cuales existe uno de primera importancia en cuanto a los resultados: la hidrofobación de una superficie por adsorción de sustancias surfactantes.

Primero y para fijar las ideas conviene explicar brevemente el proceso de separación por flotación. El caso típico consiste en separar un mineral valioso, por ejemplo un sulfuro de plomo de tipo galena, de los aluminosilicatos que lo acompañan referidos como tierra o ganga en términos metalúrgicos.

Después de moler el mineral se tiene un polvo que contiene partículas de galena y partículas de ganga; se desea separarlas mediante un proceso físico, ya que un ataque químico resultaría muy costoso. Para eso se usa el hecho de que la superficie de las partículas de galena es diferente de aquella de las partículas de ganga. En efecto, la galena puede cubrirse con **sustancias hidrofobantes** (en este caso xantatos que producen una superficie no mojable al agua), mientras que la ganga permanece mojable al agua.

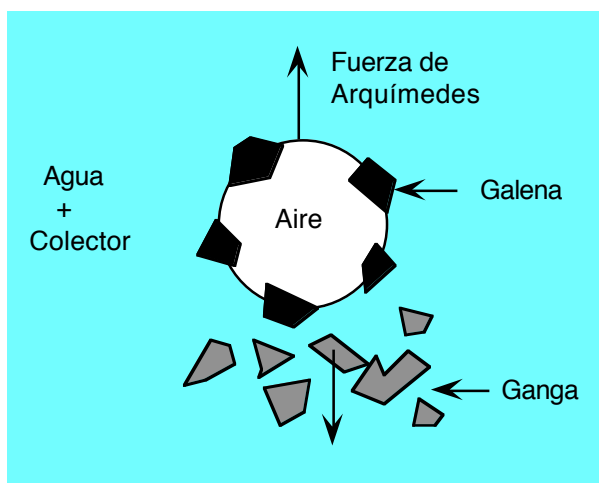


Figura 1. Principio de la separación por flotación

Se mezcla por lo tanto el polvo mineral con agua que contiene las sustancias hidrofobantes de la galena, llamadas **colectores** y se mantiene agitada la dispersión sólido-líquido. Conjuntamente se hace pasar a través de esta dispersión un flujo de burbujas de gas, a menudo aire. Las partículas hidrofobadas de galena se "pegan" a las burbujas de aire, las cuales las arrastran en su movimiento ascendente, mientras que las partículas de ganga permanecen en la dispersión sólido-líquido. Las burbujas cargadas de partículas de galena terminan por formar una espuma que se recoge por un vertedero.

Una vez rota la espuma y secado el mineral se comprueba que las partículas flotadas contienen un fuerte porcentaje en galena.

Así se separa la galena de su ganga por flotación. Este ejemplo permite entender las diferentes etapas involucradas y muestra los fenómenos elementales que se discutirán más adelante. Por el momento, examinaremos la importancia práctica y el alcance del método.

Hay evidencia de que se usaba la flotación como método de enriquecimiento de los minerales de carbonato de cobre en el siglo XV. Sin embargo, su generalización y su aplicación a diferentes procesos es mucho más reciente y corresponde a la Revolución Industrial de la segunda mitad del siglo XIX, cuando la demanda de materias primas metalúrgicas obligó a la gente a utilizar minerales de bajo tenor y a enriquecerlos antes de procesarlos.

Al principio se mezclaba el polvo mineral con agua y con aceite (vegetal o mineral). Los minerales de tipo sulfuros tienen tendencia a mojarse con el aceite y por lo tanto a ser arrastrados por las gotas de éste. Este proceso de flotación con aceite producía, sin embargo, conglomerados que a veces no se separaban. Al usar mucho menos aceite, los conglomerados formados eran de un tamaño adecuado para una separación gravitacional o mediante un tamizaje húmedo.

A finales del siglo pasado se podían separar ciertos minerales de otros: galena (PbS), sfalerita (ZnS) y pirita (FeS) mediante ajustes de pH.

A principios del siglo XX se empezó a añadir aire o CO<sub>2</sub> y a recolectar una espuma inestable llamada "*froth*" en inglés. El proceso se desarrolló en los primeros años del siglo XX incorporando todas las características actuales: agitación de la dispersión sólido-líquido con arrastre de aire y muy poco aceite como agente hidrofobante; muy rápidamente la gente se dio cuenta que podía mejorar la separación tanto en cantidad como en selectividad al usar fenoles, alcoholes, grasas o sustancias complejas como aceite de pino o resinas.

Durante de la primera guerra mundial el proceso de flotación fué usado en Australia y en EUA para extraer sulfuros de enormes cantidades de residuos de separación de sulfuro por sedimentación selectiva. Al mismo tiempo se descubrió que se podían flotar sulfuros de cobre de bajo tenor y minerales de tipo óxido.

En los años 20 se patentó el uso de los xantatos y algunos años más tarde se generalizó el uso de otros surfactantes: sulfonatos de petróleo, sales de aminas y otros catiónicos susceptibles de hidrofobar una gran variedad de superficies mediante algún tipo de adsorción.

Hoy en día se procesa anualmente del orden de 2.000 millones de toneladas de minerales molidos por este proceso.

La tabla 1 da una idea de la variedad de éstos, desde sustancias nativas como el oro o el gráfita, hasta óxidos (de hierro, estaño, cromo o titanio), pasando por sales diversas (fluoruros, carbonatos, fosfatos) incluso varios tipos de silicatos, particularmente arcillas.

Al mismo tiempo se desarrollaron numerosos procesos de flotación de sustancias no minerales entre los cuales los más resaltantes son:

- fibras de madera de los licores residuales de la fabricación de la pulpa.
- petróleo, grasas, aceites en forma residual en aguas industriales.
- carbón en polvo o cenizas.
- vidrio en basura doméstica.

Desde hace unos 30 años se usa el método llamado de **flotación por aire disuelto**, que consiste en producir burbujas muy pequeñas por expansión de una solución acuosa saturada de aire bajo presión, durante la expansión se forman burbujas de tamaño del orden de la micra, las cuales son capaces de coleccionar partículas coloidales.

Tabla 1. Minerales molidos enriquecidos por Flotación

Elementos: Oro, azufre, gráfito, diamante
Sulfuros: Galena PbS, sfalerita ZnS, pirita FeS, molibderita MoS <sub>2</sub> , cinabrio HgS, Stibirita Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
Sulfuros complejos: Calcopirita CuFeS <sub>2</sub> , Arsenopirita (As, Fe, Au) Pitchblenda (U)
Oxidos minerales: Hematita Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , magnetita Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , cositerita SnO <sub>2</sub> , rutilo TiO <sub>2</sub> , corindón Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , sílica, cuartzita SiO <sub>2</sub>
Oxidos complejos: Ilmerita FeTiO <sub>3</sub> , cromita FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , espinela MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Silicatos/alumino-silicatos: Zircón ZnSiO <sub>4</sub> , zeolitas, Beril Be <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> ), micas, talco Mg <sub>6</sub> (Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )(OH) <sub>4</sub> , Kaolín, arcillas Al <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
Sales: silvinita KCl, calcita CaCO <sub>3</sub> , fluorita CaF <sub>2</sub> , apatita Ca <sub>5</sub> F(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , iodirita AgI

Se puede por lo tanto flocular coloides agregados o floculados sin romperlos. Este proceso de flotación de coloides que a veces se combina para dar una **floco-flotación** se usa para clarificar las aguas potables y productos como el jugo de caña de azúcar, los jugos de frutas, etc.; sirve para extraer bacterias, proteínas, etc.

Pasando a la escala molecular, ciertos métodos actuales de separación pueden incluirse en la clase flotación. Se sabe en efecto, que al hacer pasar burbujas de aire en una solución de surfactantes, las moléculas de éste tienden a adsorberse a la superficie y por lo tanto a ser arrastradas por la espuma que se forma. La única diferencia con lo visto hasta ahora, no es realmente el tamaño, sino el hecho de que se trata de moléculas solubles en agua. Guiado por esta razón, conviene clasificar la extracción por espumeo como un método particular, quizás más cerca de la extracción en micelas que de la flotación.

En la figura 2 se da la clasificación de los métodos de separación por adsorción sobre burbujas, donde la flotación es un método de gran utilidad que incluye varias

subdivisiones, particularmente, la flotación de minerales constituye un tema altamente especializado.

En la **Macroflotación** se extraen partículas macroscópicas, mientras que en la **Microflotación** se trata de extraer micropartículas, especialmente microorganismos y coloides.

La **Flotación de Iones** separa iones sin actividad superficial mediante el uso de un tensioactivo que forma un producto insoluble, que se adsorbe en la superficie de una espuma que puede removerse.

La **Flotación Molecular** remueve moléculas sin actividad superficial con el concurso de tensioactivos que dan con los primeros un precipitado.

En la **Flotación de Precipitados** se extrae un precipitado sin ser el agente precipitante un tensioactivo.

La **Flotación por Coloide Adsorbente** es la separación mediante un portador de materiales disueltos que son primero adsorbidos sobre partículas coloidales. La liberación de gas disuelto para hacer flotar partículas sólidas unidas a las burbujas se usa en el tratamiento de aguas servidas.

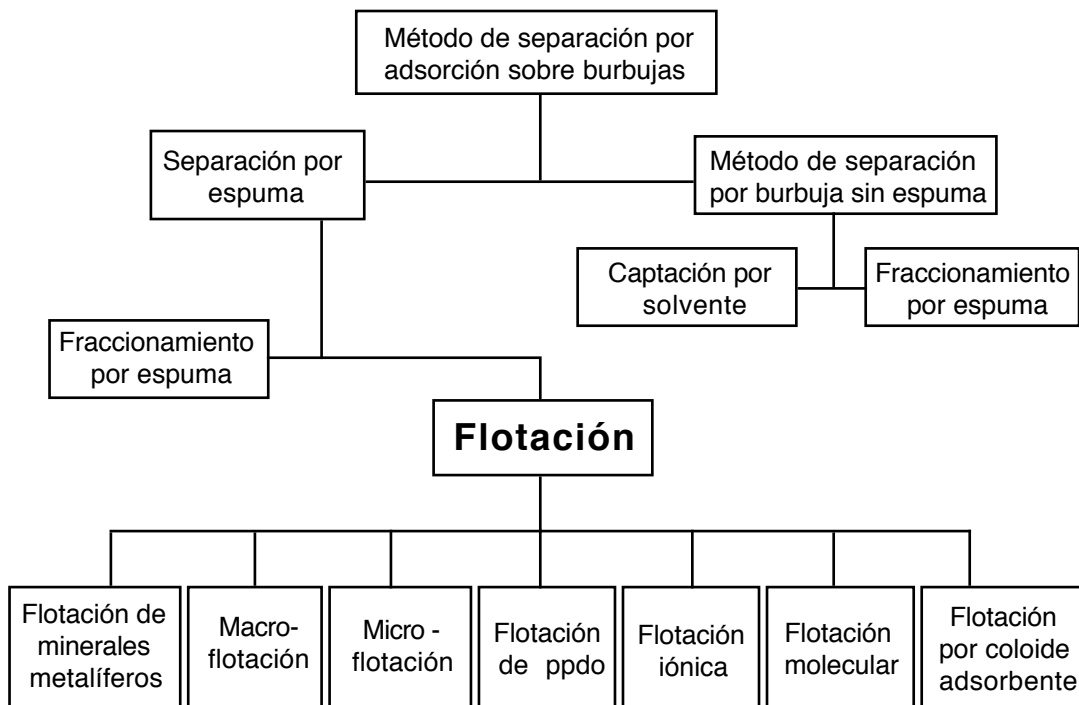


Figura 2. Flotación entre los métodos afines de separación.

## 2. FENOMENOS INVOLUCRADOS

Aún en el caso más simple de la flotación convencional por burbujas, la desagregación del proceso de flotación indica que varios fenómenos están involucrados. Se hace énfasis en los fenómenos interfaciales determinantes y en la hidrodinámica de captura.

### 2.1 FENÓMENOS INTERFACIALES

Cuando dos fluidos están en contacto con un sólido, se puede definir la **mojabilidad** del sólido respecto a cada uno de los fluidos mediante el ángulo de contacto, lo cual resulta de un equilibrio de fuerzas (véase cuaderno FIRP N° S212N). En el presente caso los dos fluidos son el aire (A) y el agua (W) ó un aceite (O) y por lo tanto se hablará de mojabilidad hidrófila o hidrófoba (Fig. 3)

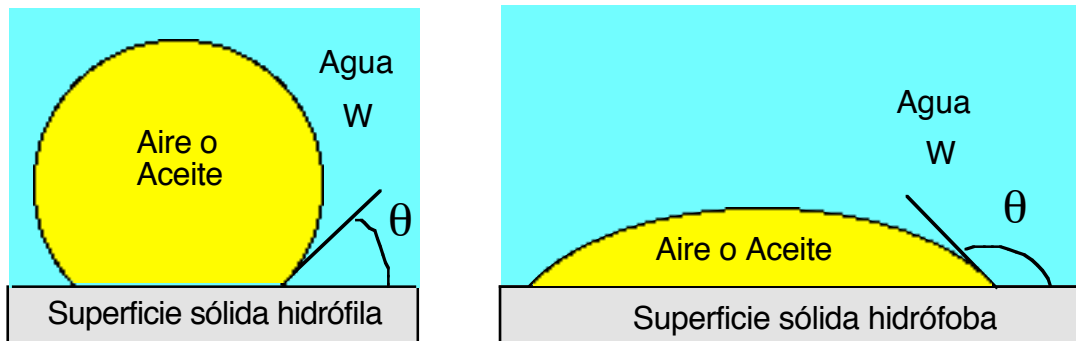


Figura 3. Superficie mojable por agua (izq.) y por aire (der.)

Si el **ángulo de contacto** con el agua, definido como lo indica la figura 3 es netamente inferior a  $90^\circ$ , la superficie es hidrófila o hidrofílica; si es netamente mayor que  $90^\circ$ , la superficie es hidrófoba. En este último caso, es el ángulo de contacto con el aire o con el aceite que es netamente inferior a  $90^\circ$ .

Cuando una superficie es hidrófoba las gotas de aceite o las burbujas de aire tienen tendencia a "pegarse", es decir, a adherirse a la superficie sólida. En el caso de la figura 4 es obvio que la probabilidad de despegue o de arranque de una burbuja en un medio agitado es mucho menor si esta burbuja está aplastada sobre la superficie (arriba izq.), que si presenta un gran ángulo de contacto (arriba der.).

Lo mismo ocurre en el caso en que las partículas son más pequeñas que las burbujas. Si la superficie sólida está hidrofobada (abajo izq.), las partículas tienden a penetrar en el interior de la burbuja, resultando así abrigadas de las turbulencias externas que puedan favorecer su despegue de la burbuja, como en el caso de una partícula hidrófila (abajo der.).

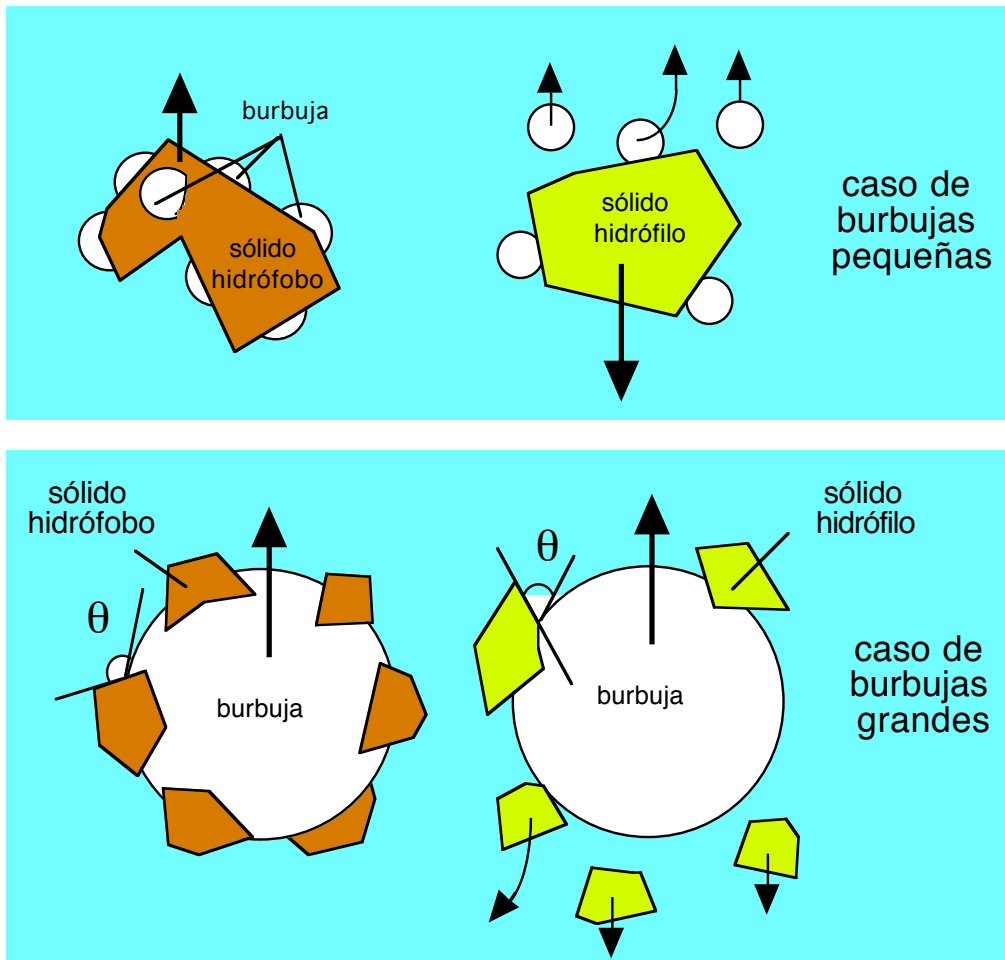


Figura 4 : Flotación de partículas hidrófobas (izq.) no-flotación de las hidrófilas (der.)

El ángulo de contacto depende de consideraciones energéticas, las cuales pueden analizarse simplemente considerando la diferencia entre los casos (a) y (b) de la figura 5, que representan una misma área interfacial.

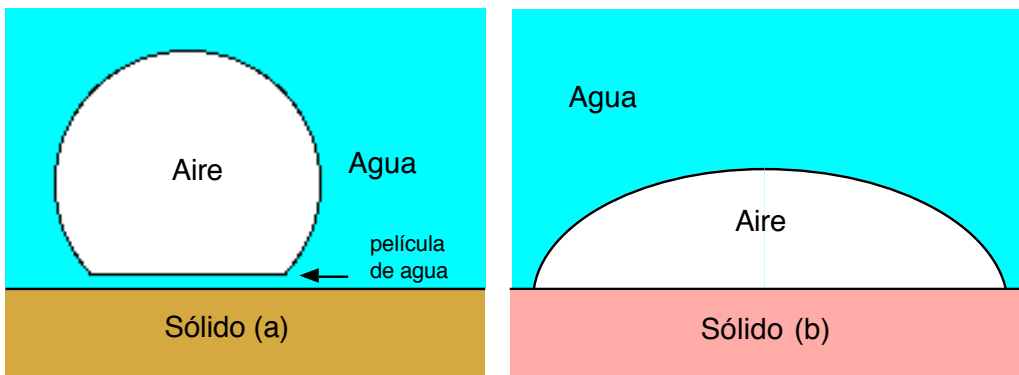


Figura 5 : Cambio al extenderse una burbuja en la superficie



En el caso (a), la energía por unidad de área de la zona de acercamiento de la burbuja al sólido corresponde a la energía de la interacción agua-aire de un lado de la película y agua-sólido del otro lado.

En el caso (b), la energía para el mismo área corresponde a la energía de interacción aire-sólido, y por otra parte a la energía de interacción agua-agua para el agua de la película que desapareció.

Por otra parte, el aplastamiento de la burbuja hace que el área de contacto entre el aire y el sólido en (b) sea mayor que el área de contacto de la película en (a).

El problema consiste en saber cual de los estados (a) y (b) es el estado más estable, es decir, cual estado ocurrirá espontáneamente si la oportunidad de un cambio de presenta.

El cálculo de las energías respectivas se puede llevar a cabo si se conocen las interacciones atractivas (Van der Waals) y repulsivas (eléctricas), así como el estado de la superficie sólida, lo cual depende entre otras cosas del pH, de la estructura molecular y de las sustancias adsorbidas.

Derjaguin introdujo el concepto de presión de disyunción de la película, lo que puede permitir también evaluar la situación. Se ha publicado un texto en inglés sobre estos conceptos (Surfaces Forces). Sin embargo, estas consideraciones son muy complejas y no pueden tratarse en un texto introductorio. Aquí nos limitaremos a consideraciones semi intuitivas.

De una parte se notará que las interacciones aire-agua y aire-sólido son probablemente menos importantes que las otras puesto que el aire es una fase no condensada, y por lo tanto no se tomarán en cuenta en la discusión.

Las interacciones agua-agua, es decir las que tienen que ver con la energía de cohesión del agua, son extremadamente fuertes. Basta notar que el agua es un líquido, mientras que su homólogo  $H_2S$  es un gas; esta cohesión se debe a las interacciones por puentes de hidrógeno, que favorecen la situación (b), salvo en el caso en que las interacciones agua-sólido sean por lo menos tan importantes. Esto ocurre si el sólido presenta una superficie polar, o si existe la posibilidad de un enlace entre el sólido y el agua. Así, los silicatos y aluminosilicatos dan reacciones de hidrólisis y se hidroxilan en superficie, tornándose hidrofílicos, lo que resulta en el caso (a). Esta hidroxilación depende por supuesto del pH, ya que se produce solamente a pH superior del punto de carga cero, punto en el cual la concentración adsorbida de iones  $H^+$  es igual a la concentración adsorbida de iones  $OH^-$ . El pH del punto de carga cero puede ser tan bajo como pH 2 para la cuarzita ( $SiO_2$ ), pH 5-6 para el rutilo ( $TiO_2$ ), o fuertemente alcalino pH 8-9 para el alúmina ( $Al_2O_3$ ).

Muchas gangas de tipo silicato estarán en agua neutra a un pH suficientemente alto para presentar una carga negativa importante por hidroxilación. En tal caso su superficie será suficientemente hidrofílica para que domine la mojabilidad al agua.

En el caso de muchos sulfuros o minerales elementales (grafito, oro) existe muy poca probabilidad de hidroxilación y la tendencia natural será una superficie hidrófoba favorable a la flotación. En todo caso, conviene favorecer esta tendencia mediante la adsorción de surfactantes.

Para tal fin se usa una sustancia surfactante capaz de adsorberse en la superficie del sólido mediante una interacción de tipo fisisorción o quimisorción, dejando hacia la fase acuosa su parte lipofílica. Tal surfactante debe poseer una muy fuerte afinidad por la superficie y por lo tanto cubrirla de una monocapa, aún a muy baja concentración en fase acuosa. Esta capa presenta el grupo hidrófobo hacia la solución acuosa, eliminando así las interacciones sólido-agua y produciendo las condiciones de hidrofobación por adsorción.

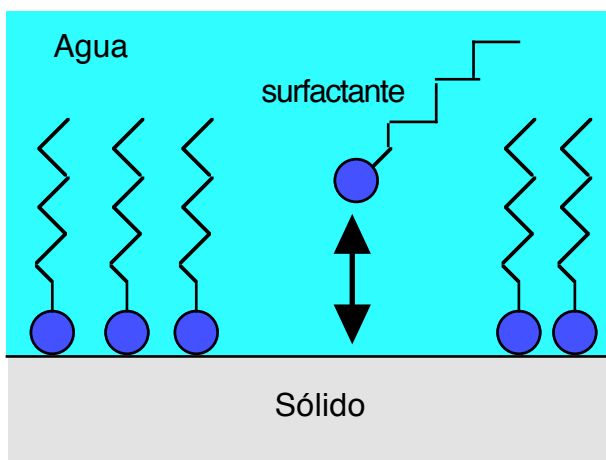
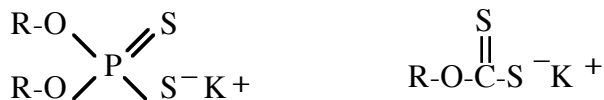


Figura 6: Hidrofobación por adsorción de un Surfactante

Con minerales de sulfuros se usan los xantatos, nombre genérico para los alquil-éteres de un ácido tio-carboxílico (der.), o los diésteres como los alquil-ditiofosfatos (izq.). Los grupos alquilo R varían desde etil hasta octil, y aún dodecil.



No se sabe muy bien cual es el mecanismo fundamental, pero existe aparentemente una quimisorción del xantato por interacción del ión sulfuro y del metal, que reemplaza un enlace roto durante la molienda; ya que es una quimisorción, se trata de un enlace muy fuerte, y por lo tanto el equilibrio de adsorción está muy desplazado.

Se puede también usar sales de ácido carboxílicos, típicamente jabones oléicos, para flotar minerales oxidados que contienen calcio, hierro o cromo, ya que la insolubilidad de los jabones de estos metales promueve la adsorción.

Los minerales cargados negativamente como la cuartzita o los silicatos, pueden flotarse con surfactantes catiónicos del tipo sales de alquil-amina o de alquil-amonio cuaternario. Se usan comúnmente para flotar talco o mica. En tal caso, el mecanismo es probablemente una atracción eléctrica que promueve la adsorción aún a muy baja concentración de surfactante. Sin embargo, se sabe que si la concentración del surfactante aumenta, el surfactante catiónico puede eventualmente adsorberse suficientemente para tornar la superficie positiva y aún producir una bicapa hidrofílica. En tal bicapa, la segunda capa se adsorbe con el grupo hidrofóbico hacia la primera capa, dejando el grupo hidrofílico hacia el agua.

La adsorción del surfactante principal llamado **colector**, puede ser favorecida por sustancias llamadas **activadores**, o inhibida por sustancias llamadas **depresores**. Por ejemplo, la presencia de iones divalentes adsorbidos en una superficie metálica favorece la adsorción de ácidos carboxílicos porque forman sales insolubles. El almidón o la dextrina compite con el colector, y por tanto produce el efecto contrario, resultando en una reducción de la adsorción del colector.

Las interacciones eléctricas resultantes de la adsorción de surfactantes catiónicos puede también tener interés en el proceso llamado de floco-flotación. Se puede por ejemplo producir circunstancias en las cuales burbujas de aire muy pequeñas se cargan positivamente y así pueden adherirse y flotar proteínas, polielectrolitos o floculados, que por lo general están cargados negativamente.

## 2.2. FENÓMENOS HIDRODINÁMICOS

Los fenómenos hidrodinámicos conciernen principalmente la probabilidad de captura de una partícula hidrofobada por una burbuja; ya que se trata de un proceso un tanto estocástico se puede hablar de probabilidades.

La probabilidad de extracción de una partícula resulta de tres factores, que pueden definirse como:

- la probabilidad de contacto o colisión partícula-burbuja
- la eficiencia de la colisión o probabilidad de adhesión
- la probabilidad de arrastre en la espuma

Es obvio que en los casos prácticos en los cuales la dispersión de partículas de sólido y de burbujas está sometida a una agitación intensa no es posible modelizar los fenómenos sino aproximadamente. De los estudios hechos se pueden extraer los siguientes lineamientos:

Las colisiones se deben a procesos inerciales, de sedimentación o de difusión browniana según que las partículas y burbujas sean grandes, micrométricas o submicrométricas. El caso de la captura de partículas por una burbuja que sube, permite ilustrar las dificultades (Fig. 7).

Sólo las partículas presentes en las líneas de corriente muy vecinas a la burbuja podrán adherirse. Además, es obvio que para una buena probabilidad de colisión se deberá reunir las condiciones de drenaje rápido de la película acuosa entre el sólido y el

gas, y darle un tiempo suficiente. Esto puede significar que debe haber poca agitación y que las burbujas deben ser muy pequeñas.

Pero por otra parte es obvio que la probabilidad de colisión entre burbuja y partícula es mayor en un medio muy agitado, especialmente si hay efectos inerciales intensos.

Si se trata de un proceso de flocotación es obvio que una agitación intensa provocará una defloculación de las partículas coloidales aglomeradas, lo que es contraproducente.

Cuando la partícula y la burbuja pasan a una distancia que puede considerarse suficientemente pequeña para ser una colisión, existe todavía la etapa de adhesión, que tiene que ver con la probabilidad de que la película líquida se rompe o no durante el "tiempo de colisión". Esto depende de factores cinéticos como el drenaje de la película, pero también de factores termodinámicos como los potenciales involucrados y el estado de las superficies.

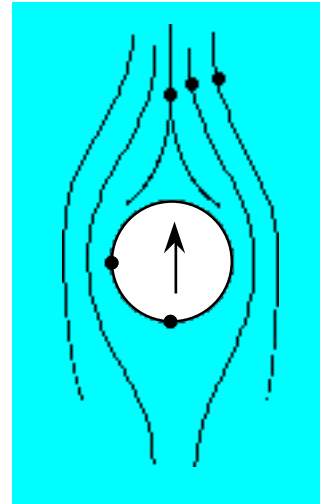


Figura 7: Captura de una partícula por una burbuja

Finalmente, cuando una partícula ha adherido a una burbuja, existe una cierta probabilidad que se mantenga adherida hasta que la burbuja alcance la espuma. Por otra parte, la agitación presente en la celda de flotación puede romper la burbuja o separar la burbuja y la partícula por efectos inerciales diferenciales. Afortunadamente, el fenómeno de **histéresis del ángulo de contacto**, tiende a favorecer la adhesión de la partícula a la gota. Sin embargo, puede ser que el tamaño de partícula sea crítico en cuanto a la eficiencia del arrastre.

Esta discusión indica que a pesar del nivel de comprensión que se ha logrado en el estudio individual de muchos fenómenos involucrados en la flotación, no se puede todavía dar cuenta cuantitativa de la combinación de estos fenómenos; por lo tanto, la flotación es todavía un proceso que requiere un estudio experimental previo para optimizar las condiciones. En particular la forma y las condiciones de operación de las celdas de flotación requiere un estudio por tanteos.

### 3. ASPECTOS TECNOLOGICOS

#### 3.1 CELDA POR DISPERSIÓN DE AIRE

El tipo de celda más clásico es aquel que comprende un recipiente de tipo cilíndrico, a menudo con deflectores en las paredes. Al centro se ubica un sistema de agitación por turbina que produce un movimiento centrífugo de la dispersión sólido-líquido y por lo tanto una baja presión en la vecindad del eje.

Un tubo concéntrico o cualquier otro dispositivo permite que el aire este aspirado cerca del centro del recipiente. El aire aspirado pasa a la zona turbulenta y forma burbujas. A menudo el agitador posee un sistema de rotor-estator que funciona a la vez por impacto y por cizallamiento para dividir el aire.

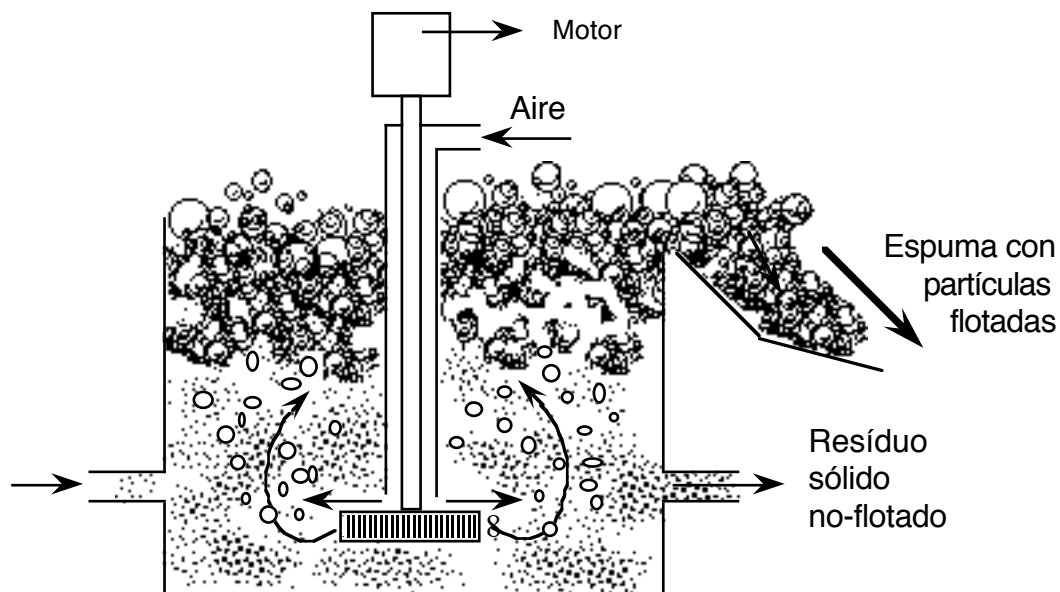


Figura 8 : Celda de flotación turbulenta

En estos sistemas se obtienen burbujas de tamaños del orden de 0,5 - 2 mm. La zona de espuma puede mantenerse más o menos alta para permitir un drenaje notable del líquido para retornarlo a la celda, o hacia la celda anterior si se trata de un proceso multietapa.

#### 3.2 CELDA DE POCA AGITACIÓN

En los casos en que se debe flotar partículas poco densas, aglomerados coloidales frágiles o semejantes, como en los procesos de floco-flotación, las celdas deben diseñarse para promover un contacto suave con burbujas muy pequeñas.

Las celdas poseen una forma alargada semejante a los sedimentadores o a los deshidratadores, en los cuales la velocidad lineal es muy baja.

Cerca de la entrada, o por lo menos en esta zona, se producen las burbujas de aire. El proceso más clásico es el llamado de **aire disuelto**. Consiste en saturar una corriente de agua (reciclo) con aire bajo presión y hacerlo pasar por un proceso de expansión a través de una boquilla o una válvula de aguja.

Así se producen burbujas muy finas del orden de 50-100  $\mu\text{m}$  que dan al líquido un aspecto lechoso, estas burbujas suben lentamente. Existen varios aparatos y procesos de dilución y expansión.

Este método es el más empleado en las plantas de clarificación de aguas.

En ciertos procesos de concentración de residuos se requieren burbujas aún más pequeñas en el rango 10-50  $\mu\text{m}$ ; para generar tales burbujas es necesario usar técnicas de formación electrolíticas de burbujas de  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ . Se usan electrodos resistentes en platino o titanio.

La figura muestra el esquema de una planta de tratamiento de agua.

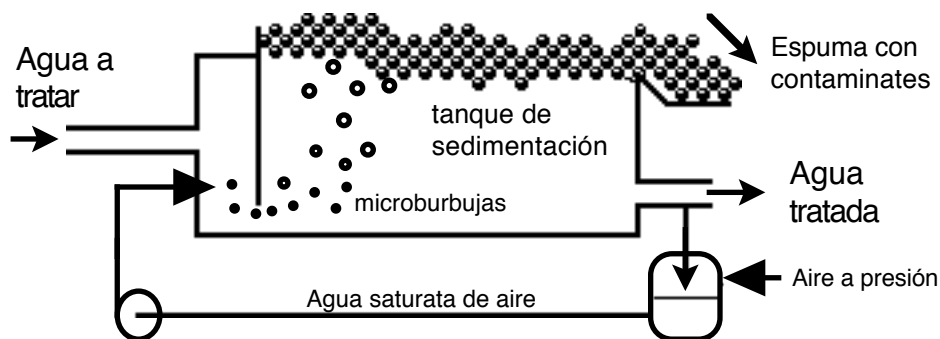


Figura 9: Planta de tratamiento de agua por flotación

### 3.3. ASOCIACIONES DE CELDAS

Las celdas de flotación poseen un tamaño máximo del orden de 30-50  $\text{m}^3$ , pero por lo general no exceden 10  $\text{m}^3$ .

En general se agrupan en bancos conteniendo cada uno entre 4 y 15 celdas montadas en serie. En general se distinguen 3 clases de bancos:

El primer tipo es el banco de celdas **extractoras** principales (en inglés **rougher**). Recibe el alimento y separan la mayoría del mineral enriquecido.

El mineral enriquecido se flota nuevamente en un banco de celdas **limpiadoras** (**cleaner**), mientras que la ganga se procesa en celdas **despojadoras** (**scavenger**).

Existen muchos arreglos posibles entre los bancos como lo indica la figura 10.

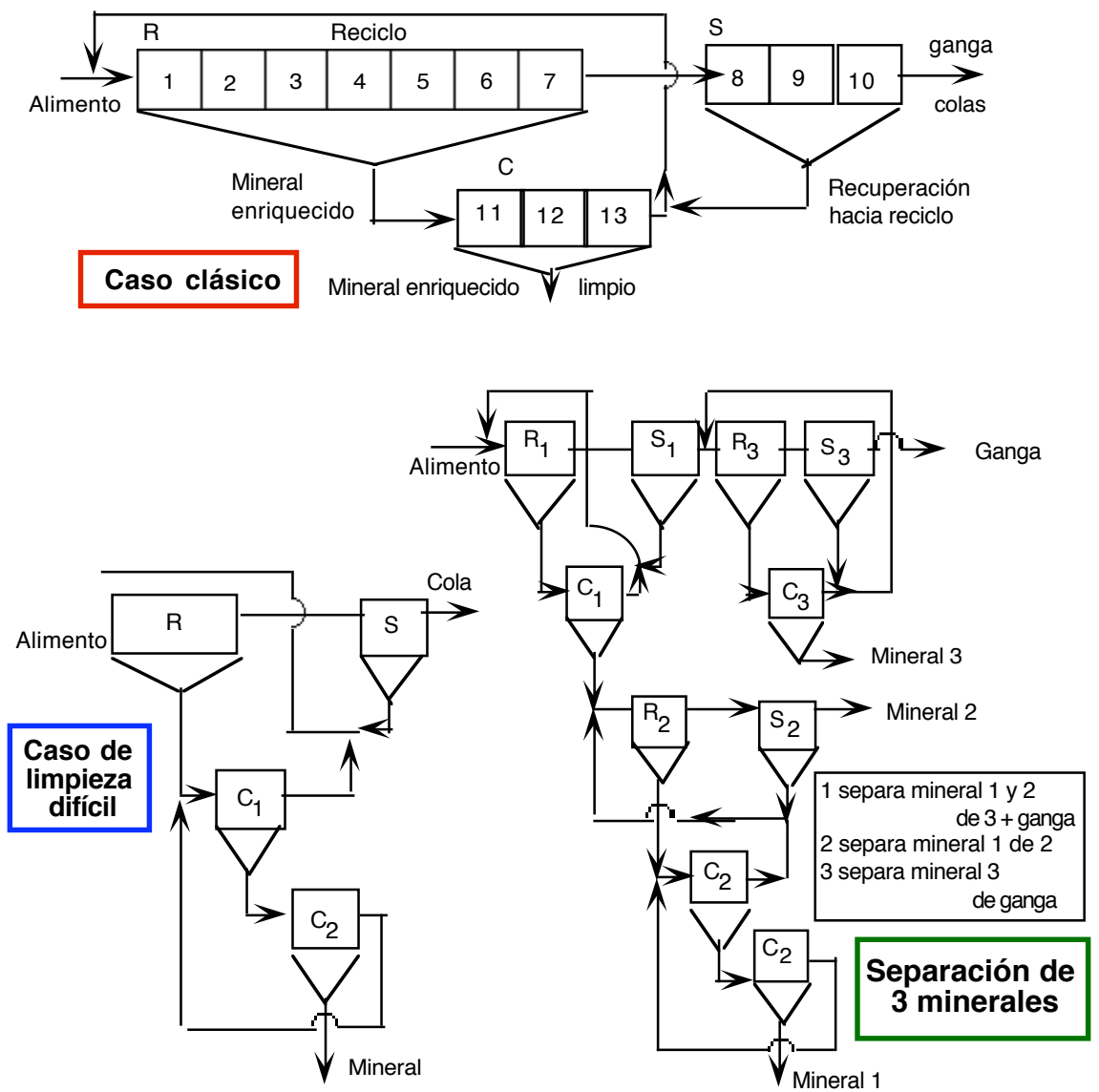


Figura 10: Tres esquemas típicos de asociación de celdas

## 4. APLICACIONES: ALGUNOS CASOS PRACTICOS

### 4.1. SEPARACION DE Cu, Pb y Zn DE UN SULFURO

Se trata aquí de un mineral de sulfuros mezclados de galena (PbS), sfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), y pirita (FeS), con carbonatos y silicatos, que puede tener la composición típica: 1% Cu, 4 % Fe, 6 % Pb, 10 % Zn.

Los colectores utilizados son xantatos, los cuales son susceptibles de hidrofobar la superficie mediante quimisorción, presumiblemente por formación del xantato del metal pesado o por adsorción de un dixantógeno por una reacción electroquímica.

Esta hidrofobación depende de la carga superficial y por lo tanto del pH, lo que permite separar los minerales.

Por otra parte, el efecto puede inhibirse con una sustancia que tiende a formar complejos como el cianuro, o a formar óxidos como el dicromato.

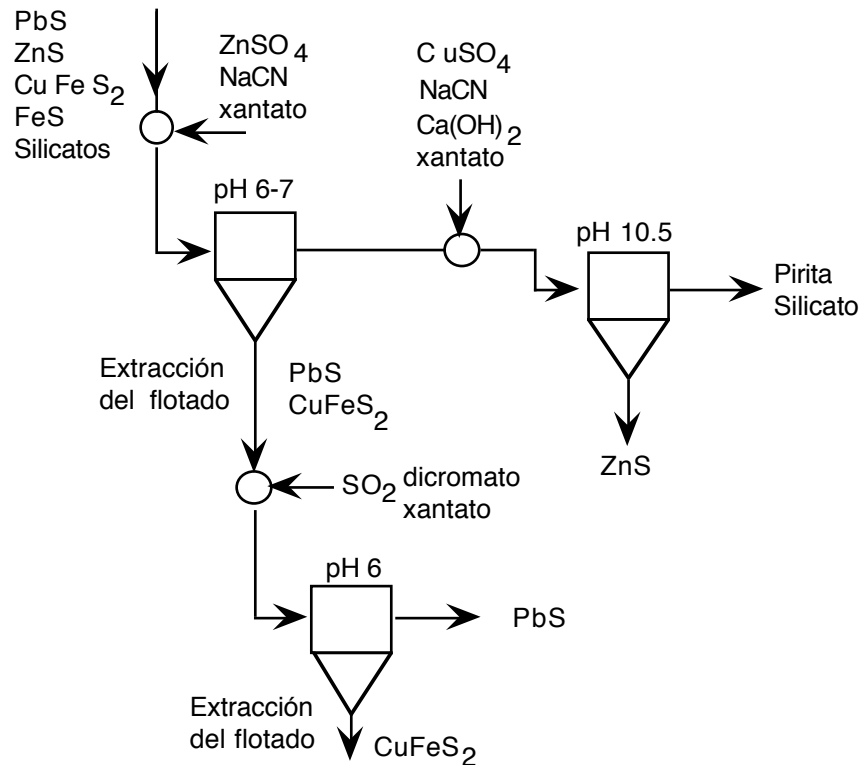


Figura 11 : Separación del cobre y del zinc de un sulfuro complejo



## 4.2. TRATAMIENTO DE UN MINERAL DE FLUORITA/BARITA

A menudo la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y la barita ( $\text{BaSO}_4$ ) se encuentran asociadas junto con impurezas de sulfuros ( $\text{PbS}$ ) y una ganga de calcita  $\text{CaCO}_3$  y silicatos. Un mineral típico puede contener : 30%  $\text{CaF}_2$ , 15%  $\text{BaSO}_4$ , 25%  $\text{CaCO}_3$ , con galena  $\text{PbS}$  (0,5%), y con cerusita  $\text{PbCO}_3$  (0,2%).

La galena se flota a pH 9 con amil-xantato, la cerusita no flota con xantato sólo y se le debe añadir  $\text{Na}_2\text{S}$  para convertir el Pb superficial en la segunda separación. No se puede añadir  $\text{Na}_2\text{S}$  al principio porque inhibiría la flotación de la galena.

Se añade luego silicato de sodio para impedir la flotación de silicatos, quebracho para impedir la flotación de calcita y dextrin para impedir la flotación de barita. La fluorita se flota a pH 9 con ácido oléico. A menudo existe toda una serie de bancos para llegar a una alta pureza de fluorita.

Se filtra la pulpa y se eliminan todas las sustancias solubles. Luego se flota el  $\text{BaSO}_4$  con alquil sulfato, usando quebracho como inhibidor de flotación de la calcita.

En este proceso se usa la acción inhibidora tanto de sustancias inorgánicas (silicatos de sodio) como orgánicas (dextrin, quebracho). También se usa la acción activadora del  $\text{Na}_2\text{S}$  para transformar la superficie de carbonato en sulfuro.

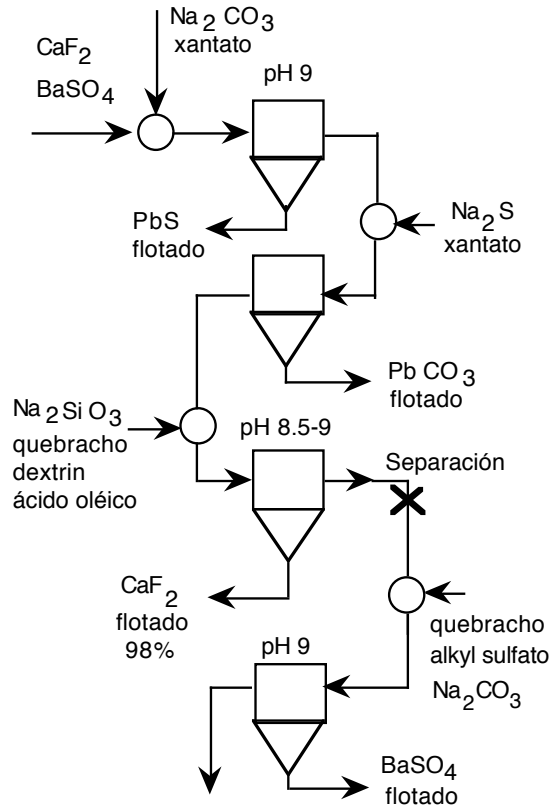


Figura 12 : Separación de fluorita y barita

## 4.3. FLOTACIÓN DE PEGMATITA

Con este ejemplo de minerales compuestos de óxidos, se efectúan las separaciones a pH ácido, alternando surfactantes catiónicos y aniónicos.

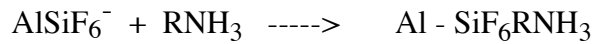
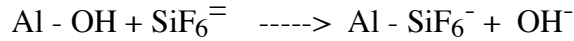
Los pegmatitas son minerales graníticos que contienen cuarzo, mica, feldspar, beril y trazas de óxidos de hierro. La separación se hace en base al pH que corresponde al

punto isoelectrico de cada óxido: mica pH 1, cuarzo y feldspar pH 2.5, beril pH 3.5, óxidos de hierro pH 6.

A pH 2.5 con aminos, sólo el mica está cargado negativamente y por lo tanto se recubre de amonios que sirven de colectores para flotarlos.

A pH 3-3.5 sólo los óxidos de hierro son netamente positivos (punto isoelectrico a pH 6) y por lo tanto flotan con un colector aniónico tal un sulfonato de petróleo.

En presencia de HF, el beril y el feldspar (aluminio-silicatos) se activan probablemente mediante la reacción :



y por lo tanto flotan, mientras que el cuarzo se queda.

La separación del beril y del feldspar requiere la eliminación de la amina adsorbida por oxidación con hipoclorito. Se flota luego el beril con colector aniónico ya que a pH 3 es positivo mientras que el feldspar es negativo.

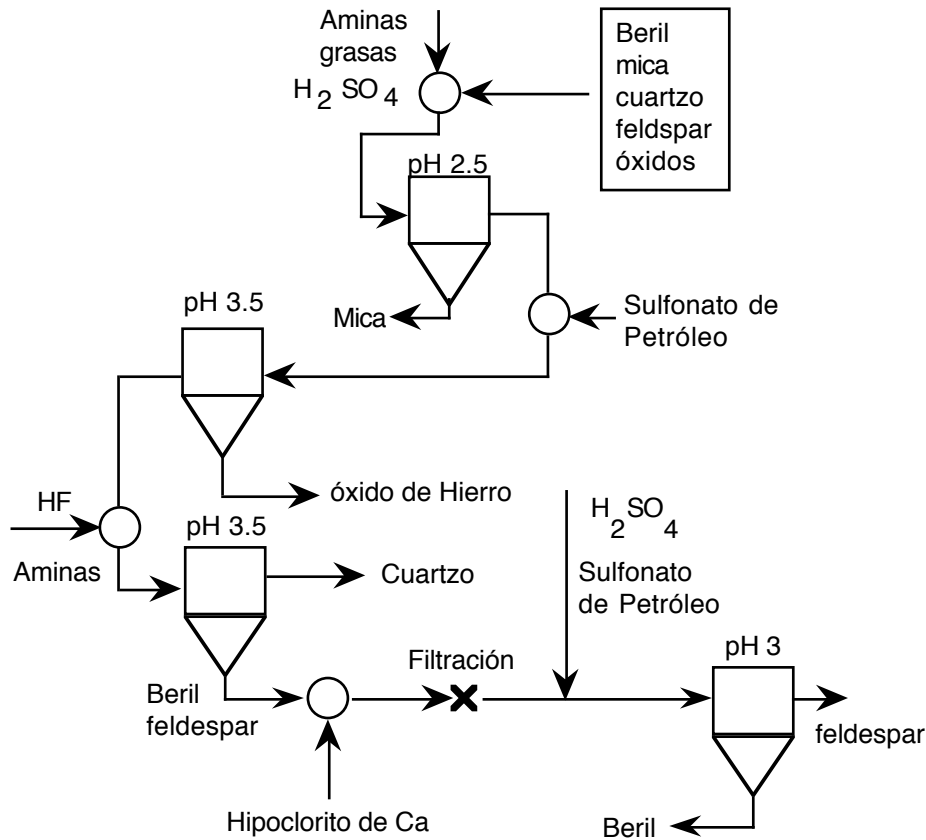


Figura 13 : Flotación de pegmatita

## 5. INVESTIGACION EN FISICOQUIMICA INTERFACIAL

Los ejemplos anteriores muestran que las operaciones de flotación dependen de dos tipos de conocimientos científico-técnicos.

De un lado, las técnicas de agitación, contacto, burbujeo, reciclaje, etc que involucran sistemas polifásicos extremadamente complejos. De otro lado, el conocimiento en cada caso del estado de la superficie de los minerales presentes, en general en función del pH, del o de los colectores y de los agentes activadores o depresores.

Sin menospreciar las enormes dificultades tecnológicas involucradas en las operaciones fluomecánicas, no cabe duda que la parte físicoquímica interfacial es determinante. Se han realizado muchos estudios, pero todavía un gran número de efectos observados quedan sin explicación satisfactoria, y no queda duda que es un campo de investigación y desarrollo en el cual queda mucho por descubrir.

Las investigaciones se dirigen en varias direcciones, entre las cuales:

- Efecto del pH sobre el estado de la superficie, para determinar el punto de carga cero, o pH al cual la superficie cambia de signo de carga.
- En presencia de un surfactante iónico susceptible de adsorberse, no sólo por atracción electrostática sino por adsorción específica por efecto hidrófobo, determinación del punto isoeléctrico, concentración del surfactante al cual la superficie cambia de signo.
- En presencia de surfactante, es importante conocer el isoterma de adsorción en función de la concentración, incluidas las diferentes posibilidades: monocapa, doble capa, etc., así como el mecanismo de adsorción.
- En presencia de mezclas de sustancias surfactantes, es importante establecer la competencia entre las diversas especies para la adsorción y la posible interacción entre sí y con eventuales aditivos espumantes.
- También es importante estudiar la posibilidad de transformación de la superficie mediante reacción química, quimisorción o fisorción, con el fin de facilitar o inhibir el papel de un colector.
- Finalmente, el recién proceso de floco-flotación se adentra todavía más en el campo coloidal. La floculación de partículas finas es de un interés particular; en este campo se pretende lograr una floculación selectiva, usando agentes específicos.
- Se hace necesario un estudio de la mezcla de las fases en la celda de flotación: efecto de la turbulencia en la colisión partícula-burbuja, (adhesión, separación); optimización de la celda, potencia necesaria y flujo de gas requerido para suspender las partículas y flotarlas.

Por supuesto todas estas líneas cubren también un gran número de fenómenos de interés en muchas otras aplicaciones industriales aparte de la flotación.

De una parte todos los aspectos de mojabilidad conciernen las industrias de tintas, pinturas, dispersiones y suspensiones, incluso cementos, pulpa y papel, etc., así como las emulsiones asfálticas y algunas aplicaciones cosméticas y alimenticias.

## REFERENCIAS

- (1) CLARKE A., y WILSON D., *Foam Flotation*, M. Dekker (1983)
- (2) FUERSTEMAN M-C. Ed.: *Flotation*, A. Gaudin Memorial Volume, AIMMPE N.Y., 1976.
- (3) IVES K. Ed.: *The Scientific Basic of Flotation*, NATO Advanced Study Institute Series, Martinus Nijhoff Publisher, La Hague, 1981. (Distribuido por Kluwer Pub. P.O. Box 322, 3300 AH Dordrech, Holanda)
- (4) LEJA J. *Surface Chemistry in Flotation*, Plenum, N.Y., 1982.
- (5) LEMLICH R. Ed. *Adsorbitive Bubble Separation Techniques*, Academic Press., N.Y., 1972.
- (6) LEMLICH R. Adsorbitive Bubble Separation Methods, *Ind. Eng. Chem.*, **60** (10), 16 (1968)
- (7) MORRISON S.R. *The Chemical Physisc of Surfaces*, Plenum Press, N.Y., 1977.
- (8) SOMASUNDARAN P., Interfacial chemistry of particulate flotation, en ref. (9) pag. 115
- (9) SOMASUNDARAN P. y GRIEVES R., Eds., *Advances in interfacial phenomena of particulate/solution/gas systems; applications to flotation research*, AIChE Symposium Series N° 150, vol 71 (1975)

Texto: <b>Fundamentos de la Flotación</b>
Autor: Jean-Louis Salager y Ana Forgiarini
Referencia: Cuaderno FIRP S335A
Versión #3 (2007)
Editado y publicado por: Laboratorio FIRP Escuela de INGENIERIA QUIMICA, UNIVERSIDAD de Los ANDES Mérida 5101 VENEZUELA



## *Derechos reservados*

### *Condiciones de Reproducción*

*Los cuadernos FIRP está destinados a docentes y estudiantes. Pueden reproducirse libremente solo para uso individual.*

*Su venta o su reproducción como material de apoyo de cursos con pago de matrícula requiere una autorización escrita del autor o del editor (firp@ula.ve)*

Laboratorio FIRP, telef: (0274) 2402954 Fax: (0274) 2402947  
Escuela de INGENIERIA QUIMICA,  
e-mail: [firp@ula.ve](mailto:firp@ula.ve)  
UNIVERSIDAD de Los ANDES Mérida 5101 VENEZUELA  
[www.firp.ula.ve](http://www.firp.ula.ve)