



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**FLOTACION DIRECTA DE ORO NATIVO GRUESO, COMO SUBSTITUTO DE
LA AMALGAMACION TRADICIONAL**

DORIA MARIA NARANJO GOMEZ

Ingeniera Química

**ESCUELA DE MATERIALES
FACULTAD DE MINAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
2012**

**FLOTACION DIRECTA DE ORO NATIVO GRUESO, COMO SUBSTITUTO DE
LA AMALGAMACION TRADICIONAL**

DORIA MARIA NARANJO GOMEZ

**TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES Y PROCESOS**

**Director
OSWALDO BUSTAMANTE RÚA, IMM, MSc., PhD**

**ESCUELA DE MATERIALES
FACULTAD DE MINAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
2012**

A Dios, a mis hijos y a mi Esposo

Agradecimientos

Expreso mis sentidos agradecimientos a:

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa. IMM, DCPME, MsC, PhD

Instituto de Minerales CIMEX

Distribuidora de Quimicos Industriales S.A

RESUMEN

Se presentan los resultados experimentales del proyecto de investigación orientada a hidrofobizar y flotar directamente oro nativo de tamaño relativamente grueso, usando un método diferente a la separación gravitacional y adsorción mercurio.

En el proyecto se realizó una caracterización fisicoquímica de las superficies de oro libre, y se logró determinar un reactivo de flotación que bajo un escenario de flotabilidad determinado (pH básico, sin requerimientos de un activador y con tiempos de residencia muy pequeños del orden de 2 minutos), generó una recuperación mayor al 90%, debido a la hidrofobicidad que se indujo selectivamente en las partículas de oro y de plata cuando estuvo presente.

Posteriormente, se diseñó una celda con características hidrodinámicas específicas que admitieran una flotación rápida (conocida en la literatura como "*flash*", la cual se puede usar directamente en la descarga de los molinos y/o clasificadores para recuperar oro libre y grueso, entendido el tamaño grueso como el oro de tamaño mayor a 150 micrómetros, aproximadamente.

La hidrofobización selectiva del oro, se efectuó primero en una celda Hallimond, posteriormente se escalaron los resultados a una celda convencional Denver y finalmente se llevó el proceso a una celda piloto "*flash*." En cada uno de los casos se determinaron los índices metalúrgicos.

Los resultados metalúrgicos obtenidos permiten proponer claramente que la flotación directa de oro nativo de tamaño relativamente grueso es posible con el uso de celdas no convencionales, como la tipo "*Flash*" empleada en este estudio.

ABSTRACT

We present the experimental results of the research project oriented and float directly hydrophobize sized native gold relatively thick, using a method different from the gravitational separation and mercury adsorption. The project conducted a physicochemical characterization of the surfaces of free gold, and it was determined that a flotation reagent flotation in a scenario specific (basic pH, with no requirement for an activator and with very small residence times of about 2 minutes), generated a recovery greater than 90% due to the hydrophobicity was induced selectively in the particles of gold and silver when it was present.

Metallurgical results obtained allow clearly suggest that the direct flotation of gold native relatively coarse size it is possible with the use of unconventional cells, such as the "Flash" used in this study.

Keywords:

Selective Hydrophobization, Free gold, Flash flotation.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PERTINENCIA.....	12
1.2 Pertinencia de la investigación	13
2.OBJETIVOS	14
Objetivo general.....	14
3.MARCO TEÓRICO.....	15
3.1 Generalidades de la concentración de minerales.....	15
3.2 Fundamentos de la flotación de oro nativo.....	16
3.2.1 Flotación de oro nativo.....	20
3.2.1.1 Superficie química del Oro y su flotabilidad natural:.....	21
3.2.1.2 El Efecto del Tamaño de Partícula	23
3.2.1.3 Selección de Colector y Dosificación.	24
3.2.1.4 Selección del Espumante.....	26
3.2.1.5 El Uso de Activadores	26
3.3 Físicoquímica de interfaces en la flotación de Au-nativo.....	27
3.4 Tecnologías del proceso de flotación usadas en esta investigación.....	34
3.4.1 Tubo Hallimond	34
3.4.2 Celda Denver.....	35
3.4.3 Flotación Flash.....	36
3.4 Mecanismo de hidrofobización selectiva a la luz de la teoría de potenciales mixtos y quimisorción de reactivos.....	38
4.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	42
4.1 Caracterización del mineral	42
4.2 Caracterización físicoquímica de la superficie de oro.	44

4.3 equipos usados en la caracterización	48
4.4 Descripción de la celda de flotación flash y diseño.	49
4.5 Descripción de los reactivos usados.....	52
4.6 Montaje experimental.....	54
4.6.1. Pruebas de microflotación en celda Hallimond:	54
4.6.2. Pruebas en celda Denver convencional:	55
4.6.3. Pruebas en celda flash.....	56
5. RESULTADOS.....	59
5.1 pruebas de micro flotación en celda Hallimond.....	59
5.2 Pruebas de flotación en celdas Denver	61
5.3 Pruebas de flotación en celda flash.....	62
5.4 Medición de ángulo de contacto para las partículas de oro con adición de colector.....	63
6. DISCUSIÓN	66
6.1 Flotabilidad natural del oro nativo	66
6.2 Aspectos operacionales	66
6.3 Impacto ambiental del proyecto	68
7. CONCLUSIONES	70
8. BIBLIOGRAFIA	771

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 “Coco” amalgamador usado en la pequeña minería en Antioquia 13

Figura 2.3 Parametros del proceso de flotación espumante. (Tomado de Fuerstenau, 1999) 16

Figura 3.3 Estudio cinético de oro libre (Tomado de Klimpel, 1999)..... 23

Figura 4.3 Doble capa eléctrica (Tomado de ZETA-METER INC, 1998)..... 29

Figura 5.3 Representación esquemática de una gota de líquido (L) reposando en equilibrio sobre una superficie sólida horizontal (S) en una atmosfera de gas (G). Ángulo de contacto y tensiones en el punto 31

Figura 6.3 Representación de la celda Hallimond 34

Figura 6.1 Microflotaciones en celda Hallimond con partículas de oro en el I.M. CIMEX 35

Figura 7.3 Celda de flotación Denver..... 36

Figura 8 .3 Celda de flotación Flash. (Outokumpu, 2004)..... 37

Figura: 9.3 Representación esquemática de curvas corriente-potencial, mostrando los potenciales reversibles de un par de reacciones redox acopladas y el potencial mixto cuando está presente el acople. (Tomada de Castro y García, 2003) 39

Figura 10.3 Voltagra (Tomado de castro y Garcia, 2003) 40

Figura 11.3 Potenciales Eh versus n° átomos de C de diferentes alquil ditiofosfatos (Tomado de Castro y García, 2003) 41

Figura 12.4 Fotografía de las mediciones de angulo de contactosobre una placa de oro ley 999 sin colector..... 45

Figura13.4 Fotografía de las mediciones de angulo de contactosobre una placa de oro ley 999 colectada por 20 min. con 3501. 45

Figura 14.4 Lecturas de Potencial Z para Oro a diferentes tiempos de estabilidad y diferentes Ph..... 45

Figura 15.4 Lecturas de Potencial Z para Oro, pirita y Galena a pH basicos 46

Figura 16.4 Partícula de oro sin colector.....	47
Figura 17.4 Partícula de oro con colector	47
Figura 18.4 Medidor de ángulo de contacto OCA 15 PLUS.....	48
Figura 19.4 Zetámetro Zeta Sizer Nano ZS90 Malvern.....	49
Figura 20.4 Representación Esquemática del funcionamiento del AFM.....	49
Figura 21.4 Variables estandarizadas para la celda de flotación skim-(Tomado de Outokumpu, 2004)	50
Figura 22.4 Diseño preliminar prototipo celda de flotación	51
Figura 23.4 Celda de flotación flash, instalada en le IM. CIMEX	51
Figura 24.4 Montaje para pruebas de microflotación a).Celda Hallimond, b) Bomba peristáltica	54
Figura 25.4 Pruebas de flotación en celda Denver	56
Figura 26.4 Pruebas de flotación en celda Flash	58
Figura 27.4 Tratamiento de las colas y el concentrado obtenidos en el proceso de flotación flash.....	58
Figura. 28.5 Recuperación de oro nativo con diferentes colectores. En celda Hallimond.....	60
Figura. 29.5 Recuperación de oro a diferentes pH.....	61
Figura 30.5 Valores del ángulo de contacto para la partícula de oro con diferentes colectores y a diferentes tiempos de acondicionamiento	64
Fig. 31.5-a. Colector 3501 a 30 min	64
Fig.31.5-b Colector 3501 a 30 min y pH.....	64
Fig. 31.5-c Colector 3501-10 min	64
Fig. 31.5-d Colector 3501 – 2 min.....	64
Figura 32.5 Configuración Celda Flash – Columna.....	65
Figura: 33.6 Esquema flotación flash, en circuito de Molienda	67
Figura 34.6 Celda de flotación Flash.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.3 Diferentes métodos de concentración de minerales, propiedades diferenciales y algunos equipos empleados (Tomada de Bustamante et al, 2008)	15
Tabla 2.3 Menas típicas que contienen oro nativo recuperable por flotación (Tomado de Allan y Woodcock, 2001; Castro S.J, 2003)	18
Tabla 3.3 Potenciales estándar de los alquil Ditiolfosfatos	41
Tabla 4.4 Análisis granulométrico mineral de prueba	43
Tabla 5.4 Distribuciones de oro en las corrientes de concentrado y colas del bateo. Ensaye al fuego No convencional	44
Tabla 6.4 Medidas del ángulo de contacto a una superficie de Au nativo	44
Tabla 7.4 Colectores pre- seleccionados (Tomado de: Manual de productos químicos para minería, CYTEC®, 2009.)	52
Tabla 8.4 Referencias de Colectores (Tomado de: Manual de productos químicos para minería, CYTEC®, 2009.)	53
Tabla 9.4 Variables usadas en las flotaciones de la celda Denver	56
Tabla 10.4 Diseño de experimentos para las pruebas de flotación en celda flash	57
Tabla 11.5 Resultados Pruebas de microflotacion con diferentes reactivos	59
Tabla 12.5 Recuperación de Oro a diferentes pH	60
Tabla 13.5 Mejores resultados de flotación en celda Denver	62
Tabla 14.5 Mejores resultados de pruebas en Flotación Flash	62
Tabla 15.5 Resultados prueba en configuración celda flash y columna	65

INTRODUCCIÓN

La flotación de oro y minerales auríferos ha sido estudiada por diferentes investigadores, (Teague, *et al.* 1999; Allan & Woodcock, 2001, Stephen *et.al.*, 2003) y en particular de oro nativo la literatura presenta algunos resultados (Allan & Woodcock, 2001), que hacen pertinente la posibilidad de eliminar el mercurio en las etapas de concentración de limpieza para la recuperación de oro y/o competir con los concentradores gravitacionales que siempre se han usado.

El uso del mercurio en la minería colombiana ha generado serios impactos ambientales (Veiga, 2010) y tecnológicos que históricamente hacen que exista una asociación maligna entre la minería aurífera y la contaminación de suelos, aguas superficiales y demás actores en los ambientes alrededor de las minas.

Eliminar el uso de mercurio es una tarea difícil, dado que se deben realizar grandes esfuerzos de investigación para sustituir un reactivo completamente exitoso en la recuperación de oro libre proveniente tanto de los frentes de explotación en vetas, como en aluviones.

La flotación flash es de uso reciente en la minería mundial (Outokumpu, 2004, (Kujawa, 2006), (Makanza et al. 2008) para la recuperación de oro metálico en la descarga de molinos o corrientes de tamaño grueso en las descargas de clasificadores, pero normalmente se requiere de activadores de flotación para enmascarar las superficies del oro libre y poder utilizar Tiocoletores similares a la flotación de Sulfuros Metálicos.

Por otro lado, la flotación de minerales auríferos tradicionalmente ha operado para la hidrofobización del complejo pirita-oro en las menas auríferas, dada la asociativas que ocurre en los depósitos de oro en los cuales el oro esta microestructuralmente ligado a los granos de pirita, básicamente en las fronteras de grano. Sin embargo la hidrofobización selectiva de oro nativo y su posterior flotación ha sido poco estudiada y se presentan inclusive algunas contradicciones en la literatura respecto a la hidrofobicidad natural del oro nativo. (Marsden and House, 1992, Allan and Woodcock, 2001)

En este sentido, la flotabilidad natural del oro se encontró asociada mas bien a razones de aspecto de las partículas auríferas, las cuales admiten una flotabilidad de origen mecánico debido al desbalance de fuerzas de las partículas de oro en medios fluidos pero no necesariamente están asociados a un trabajo químicos de hidrofobicidad natural. (Marsden and House, 1992)

Lo anterior implica que las razones de aspecto pueden generar anisotropías, esto es, diferencias substanciales en el comportamiento fisicoquímico de las superficies de los granos de oro, cuando estos presentan razón de aspecto tipo laminar; pero no necesariamente esta anisotropía induce una hidrofóbica natural

en la partícula. Bajo estas condiciones para esta investigación el carácter hidrofílico de los granos de oro es evidente y simplemente la razón de aspecto puede controlar diferentes grados de interacción con los grupos iónicos del agua; pero siempre bajo condiciones hidrofílicas.

Castro S.J, 2003, realizo ensayos obteniendo concentrados enriquecidos en oro y con presencia de oro libre, usando tiocoletores en columna de flotación, con tamaños relativamente finos. La obtención de concentrados con oro libre y oro asociado implica que es posible flotar oro nativo con cargas de reactivos basados en colectores tiolicos, pero de manera selectiva y depresando el complejo pirita - oro

La flotación selectiva de oro nativo y de tamaño relativamente grueso presenta dos retos en esta tecnología:

- Hidrofobización selectiva del oro nativo
- Obtención de espumas mineralizadas con oro de tamaño grueso, evitando la sedimentación de estas partículas.

Una alternativa que se visualiza es la flotación flash de oro nativo que actualmente no se usa en Colombia, porque sigue vigente la utilización de jigs como concentradores "Rougher" en donde se obtiene en la descarga de éste, oro metálico de tamaño relativamente grueso y el cual es sometido posteriormente a la amalgamación.

Basados en esto, se propuso plantear una estrategia experimental fundamentada en la fisicoquímica de superficies que permita determinar las características de la energía libre superficial de partículas de oro, y que admitan una quimisorción selectiva de un tensoactivo que reduzca la fuerte tensión superficial y evite la interacción con los grupos iónicos del agua. Esto implica a su vez, un estudio de la química de los reactivos para identificar un reactivo de flotación con especificaciones concretas sobre la hidrofobicidad de oro de manera selectiva.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PERTINENCIA

En Colombia y particularmente en Antioquia, se usa intensivamente el mercurio para la obtención final en las plantas concentradoras de Au metálico, el cual posteriormente es llevado a fundición y conformación de lingote. Lamentablemente este sistema de recuperación ha sido reiteradamente considerado poco amigable con el medio ambiente y existen muchas investigaciones que advierten sobre el peligro sobre la salud y el medio ambiente que ocasiona el uso del mercurio en la minería de oro (García y Ruano, 1992, Mesa y Gaviria, 1992).

Particularmente en la Minería de veta, el oro se encuentra asociado a la plata y es posible obtener en la descarga de los molinos primarios de bolas, partículas liberadas de Au y de Ag las cuales por su tamaño relativamente grueso (intervalo malla 100 y malla 200) serían devueltas por los clasificadores en las corrientes gruesas como recirculación.

Lo anterior ha implicado el uso de equipos de concertación gravitacional tipo jigs para extraer rápidamente este oro relativamente grueso y evitar que se devuelva al molino y/o inicie un proceso de recirculación a través de toda la planta. Por otro lado en pequeña minería este mineral es sometido a los denominados “cocos amalgamadores”, los cuales cumplen un doble rol, liberar oro similar a la molienda de bolas y a su vez amalgamar, pero se tiene evidencia de que en este tipo de equipos, ninguno de los dos procesos se cumple efectivamente; la molienda es relativamente pobre y la amalgamación es permanentemente destruida por la interacción de la bolas con el complejo amalgama-mineral, y sin embargo aun se usa en nuestra minería.

Lamentablemente, las soluciones tecnológicas en este tipo de minería, están asociadas al uso de estrategias que son poco conocidas en nuestro entorno, al uso de reactivos importados y de equipos distribuidos por empresas mineras con altos costos; por lo que solamente algunas grandes empresas han mirado la posibilidad de eliminar este tipo de recuperación de Au. Asociado a esto no se tiene la posibilidad de recuperar la plata que al igual que el oro se encuentra liberada en la descarga de los molinos pues la interacción mercurio-plata no presenta fuerzas de adhesión tan fuertes como las del complejo Oro-mercurio.

Una alternativa en la modernidad ha sido el uso de celdas de flotación que recuperen “rápidamente” el oro libre y relativamente grueso mediante el uso de celdas que permitan una recuperación rápida de oro por lo cual suelen denominarse celdas de flotación “*flash*.”

En la actualidad, se puede caracterizar la minería de veta de oro como una empresa que posee varias amenazas respecto a la recuperación de metales

preciosos: no hay una recuperación completa de oro, la cianuración poco sirve en la recuperación de plata, existe una asociación entre la utilización de nuevas tecnologías y elevados costos de producción, y poco uso de tecnologías de uso intensivo de conocimiento que se apropien a este tipo de minería.

1.2 Pertinencia de la investigación

La contaminación con mercurio en las regiones mineras auríferas de Antioquia, ha sido corroborada por diferentes investigadores (Veiga, 2010, ONUDI, 2007). Existe una buena correlación entre la minería artesanal y el incremento de las pérdidas de mercurio en los procesos de enriquecimiento de minerales auríferos, pues mientras la gran minería reporta pérdidas de 0.001 gr de mercurio/gr de oro producido, la pequeña minería reporta pérdidas de hasta 14.5 gr de mercurio/ gr de oro producido en promedio y el cual puede ascender hasta 66.5 gr de mercurio/ gr de oro producido (Veiga, 2010), con valores mínimos de 7.5 gr de mercurio/ gr de oro producido, lo que implicaría unas pérdidas globales de Mercurio alrededor de 55.1 ton/año solo en 5 municipios del Nordeste Antioqueño como Segovia, Remedios, Nechí, El Bagre, Zaragoza (Veiga, 2010).

Se estima que del 100% de las pérdidas de mercurio, el 34% se emite a la atmósfera y el 66% va a parar a las corrientes de agua o quebradas (Veiga, 2010), dado que la tecnología que tradicionalmente usan los mineros en estas regiones consiste en el uso de cocos amalgamadores (ver figura 1), en los cuales se estima que alrededor de un 50% del mercurio se pierde en el proceso.



Figura 1-1. “Coco” amalgamador usado en la pequeña minería en Antioquia.

(Foto entable El pomo piñal. Segovia – Antioquia)

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Investigar la hidrofobización selectiva de Au grueso nativo y su recuperación en un proceso de flotación Espumante.

Objetivos específicos

- Estudiar las propiedades Fisicoquímicas de Superficie de oro grueso nativo que permitan hidrofobización selectiva.
- Comprender el mecanismo de hidrofobización selectiva considerando teoría de potenciales mixtos y quimisorción de reactivos
- Estudiar la hidrodinámica de una celda de flotación Flash y su impacto en la recuperación de oro nativo a partir de minerales de veta.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades de la concentración de minerales

La concentración de minerales es la operación en la cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés. [Bustamante *et al.*, 2008].

Para ello, se pueden implementar dos métodos de separación: Métodos que emplean diferentes propiedades físicas o volumétricas de las sustancias minerales y Métodos que usan propiedades físico-químicas de superficie, como:

- La adsorción o no de agua en la superficie del sólido, por lo tanto los que adsorban agua se humectarán (hidrofílicos) y otros que no se humectan (hidrofóbicos).
- Adsorción selectiva de un tensoactivo de tal manera que se produzca una aglomeración selectiva un mineral o varios minerales

La Tabla 1, muestra los diferentes métodos de concentración que suelen utilizarse industrialmente y las propiedades diferenciales que utiliza cada uno de ellos; lo mismo que los nombres de los aparatos más empleados. [Bustamante *et al.*, 2008].

Tabla 1.3 Diferentes métodos de concentración de minerales, propiedades diferenciales y algunos equipos empleados (Tomada de Bustamante *et al.*, 2008)

Nombre del Método	Propiedades que emplea para separar	Principales equipos
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	Sedimentador, Hidrociclón, Jig, Canalón Canaletas, Mesa Vibratoria, Espiral, Conos de Separación Centrífugas, entre otros
Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética (atracción o no frente a una Magneto u imán)	Separador magnético de tambor, rodillos magnéticos, separador magnético tipo "carrusel", etc.
Nombre del Método	Propiedades que emplea para separar	Principales equipos
Concentración eléctrica	Conductividad eléctrica	Separador eléctrico de alta intensidad
Flotación espumante	Hidrofobicidad y/o hidrofiliidad del mineral (mojamiento o no)	Celdas de flotación y columnas de flotación
Floculación selectiva	Adsorción específica de un polímero y formación de floculo	Sedimentador
Coagulación selectiva	Adsorción específica de iones inorgánicos y formación de una coágulo	Sedimentador

3.2 Fundamentos de la flotación de oro nativo

La flotación es un proceso fisicoquímico de concentración de minerales en suspensiones acuosas que consiste en separar partículas "hidrófobas" (repelentes o sin afinidad química con el agua) de partículas "hidrofílicas" (afines químicamente con el agua), asistida con inyección de burbujas de aire [Bustamante *et al.*, 2008]. Este proceso es uno de los más importantes para la recuperación de oro y metales valiosos. Su principal restricción es recuperar partículas de material grueso (intervalo de 400 – 250 μm).



Figura 2-3. Parámetros del proceso de flotación espumante. (Tomado de Fuerstenau, 1999)

El proceso de flotación es selectivo y está basado en una propiedad característica, "la hidrofobicidad", que puede ser natural de una superficie de un mineral o inducida por medio de la adsorción de sustancias surfactantes. La flotación es un proceso complejo que implica estudios de fenómenos de hidrodinámica y fisicoquímica de superficies, además implica la interacción entre varios factores, entre los que se encuentran: la naturaleza química de los

reactivos de flotación, componentes del equipo y componentes de operación, tal como se ilustra en la figura 2. (Fuerstenau, 1999)

La flotación de oro más común es la del complejo "pirita-Au" y en este caso los reactivos llamados tiocoletores son muy poderosos. (Castro y García, 2003)

La mayoría de los trabajos reportados (Allan y Woodcock, 2001) sobre la flotación de oro, han sido realizados usando oro refinado de alta pureza y aleaciones de oro y plata, con el fin de determinar las interacciones oro-colector y la naturaleza de adsorción de los iones de colector en la superficie del oro. Además, algunos trabajos se ha realizado para determinar si el oro puro tiene o no hidrofobicidad natural y por lo tanto, un cierto grado de flotabilidad natural. Aunque algunos trabajos se han realizado sobre las partículas de oro nativo recuperado de depósitos de placer (Allan y Woodcock, 2001), poca información aparece sobre trabajos realizados con partículas de oro nativo seleccionadas de depósitos de veta, (Allan y Woodcock, 2001) y la flotación de oro nativo ha sido poco estudiada y los mecanismos de hidrofobización son poco conocidos.

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. (Allan y Woodcock, 2001)

La composición mineralógica de una mena es muy importante, cuando se considera su procesamiento por flotación espumante, tanto desde el punto de vista de los reactivos a emplear como de la configuración de los dispositivos de flotación. Aparte de una adecuada selección del colector, también es importante determinar si cualquiera de los minerales de ganga es susceptible de hidrofobizarse y por lo tanto será necesario considerar el empleo de depresantes. (Castro S.J, 2003)

Las menas que contienen oro nativo susceptibles de tratamiento por flotación presentan variadas composiciones mineralógicas y van desde menas de oro libre, hasta menas de metales base donde el oro constituye un componente secundario recuperado como subproducto. Las formas geológicas de ocurrencia incluyen depósitos de placer, depósitos hidrotermales y epitermales, material volcánico, rocas sedimentarias y metamórficas y material oxidado y/o meteorizado. La Tabla 2 resume algunas características importantes desde una perspectiva metalúrgica, de las menas que contienen oro y pueden ser objeto de procesos de flotación. (Allan y Woodcock, 2001), (Castro S.J, 2003)

Tabla 2-3. Menas típicas que contienen oro nativo recuperable por flotación
(Tomado de Allan y Woodcock, 2001; Castro S.J, 2003)

TIPO DE MENA	FORMA POSIBLE DE PRESENTACIÓN DEL ORO	PRINCIPALES SULFUROS MINERALES HUÉSPEDES	POSIBLES MINERALES PROBLEMA PRESENTES
Deposito de placer consolidados	Nativo, con Recubrimientos	Ninguno	Arcillas
Oxidados próximos a superficie	Nativo, con Recubrimientos	Ninguno	Pirofilita Otras Arcillas
Menas Silíceas filoneanas	Nativo, Invisible	Pirita, Arsenopirita	Muy Pocos
Oro - pirita	Nativo, Invisible	Pirita, Arsenopirita, Pirrotita	Pirita que no Contiene Oro
Oro-Teluro - Pirita	Nativo, Invisible, Teluro	Pirita, Arsenopirita, Pirrotita	Pirita que no Contiene Oro
Sulfuro monometálico (Cu, Sb, Bi)	Nativo, Invisible	Calcopirita, Bornita, Estibina,	Pirita que no Contiene Oro y/o Pirita Aurífera
Sulfuro Polimetálico Cu-Pb-Zn-Pirita	Nativo, Invisible	Calcopirita, Galena, Esfalerita, Pirita	Pirita Aurífera
Carbonácea	Nativo, Asociaciones Carbón-Oro	Pirita	Materia Carbonosa

3.2.1 Flotación de oro nativo

La flotación es uno de los procesos más importantes en la actualidad, para la recuperación de oro asociado a sulfuros, principalmente a pirita (Marsden and House, 1992), y se vislumbra como uno de los procesos que puede remplazar la amalgamación con mercurio para la recuperación de oro nativo.

La recuperación de oro nativo relativamente grueso (hasta 200µm) por medio de la flotación espumante, ha sido investigada por algunos autores (Marsden and House, 1992, Allan and Woodcock, 2001), sin embargo existen algunas imprecisiones respecto al comportamiento hidrofóbico del oro nativo y su relación

con la razón de aspecto de algunas partículas auríferas que por su maleabilidad poseen la tendencia a configurarse de forma aplanada (escamas) lo cual provee a las partículas de áreas suficientemente grandes como para alcanzar flotabilidad mecánica en los equipos de recuperación. A manera de ejemplo, es el caso de las partículas de oro aluvial que son naturalmente escamosas y que han sufrido mucha deformación por trabajo mecánico de aplastamiento durante su formación de la roca huésped y transporte hasta la ubicación final del depósito (Teague et al., 1999).

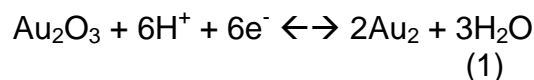
Considerando el hecho de que el oro nativo y el electrum (Cornelius, 2001) tienen composición variable y diferentes partes de una misma partícula podrían presentar diferentes composiciones (Marsden and House, 1992, Allan and Woodcock, 2001), la recuperación por flotación de estas partículas es posible siempre y cuando se resuelva desde el punto de vista de la superficie la heterogeneidad del comportamiento hidrofóbico que genere la recuperación de soluciones sólidas de oro nativo tales como el electrum.

El oro nativo es una aleación de composición no especificada no necesariamente uniforme y de ocurrencia natural que contiene alrededor del 80 al 100% de oro, del 1 al 15 % de plata y entre el 0 y el 5 % de cobre (Anhaeusser *et al.* 1987). Por su parte el electrum se definió originalmente como una aleación equiestequiométrica de oro y plata (Shikazono and Shimizu, 1988), pero en el uso corriente significa prácticamente cualquier aleación oro-plata rica en ésta última.

Según (Klimpel, 1999), los aspectos más importantes en la flotación de oro nativo son:

3.2.1.1 Superficie química del Oro y su flotabilidad natural:

En un medio acuoso no complejo, el oro no es reactivo ya que los iones de oro y los óxidos son termodinámicamente inestables, requiriendo condiciones fuertemente oxidantes para su formación, ecuación (1) (Marsden and House, 1992)



$$E = 1,457 - 0,059\text{pH} \text{ V}$$

La quimisorción del oxígeno sobre la superficie del oro comienza a un potencial encima de 1,4 V con monocapas de recubrimiento alcanzadas a 2,0 V. Esto es atribuido al crecimiento de una capa de óxido (Au_2O_3) en soluciones ácidas y una capa de hidróxido ($\text{Au}(\text{OH})_3$) en soluciones básicas en altos potenciales. La voltimetría ha determinado que estas reacciones ocurren en rangos en los cuales

se depende de la orientación de los cristales de oro y la presencia de impurezas. (Marsden and House, 1992)

Las superficies de oro sin pátinas son naturalmente hidrofílicas, (Marsden and House, 1992), sin embargo, si se adsorbe una monocapa de contaminantes carbonaceos desde el aire o la solución, ésto puede ser suficiente para que se produzca una superficie hidrofóbica. Como resultado, el oro puede presentar hidrofobicidad natural asociado básicamente a sus pátinas. (Chryssoulis y Dimov, 2003)

Por otra parte, proponen que la mineralogía del mineral tiene un efecto profundo sobre las condiciones de flotación empleadas y por lo tanto concluyen que el oro es naturalmente flotable en sistemas industriales, lo cual significa que puede ser recuperado sin adición de un colector (Allan and Woodcock, 2001)

Por otro lado; la adsorción de hidrocarburos pueden presentarlo como naturalmente hidrófobo según Marsden and House, 1992.

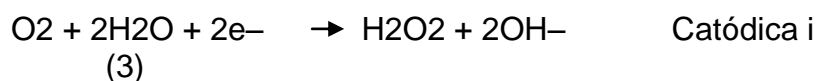
La composición química de las partículas de oro y sus asociaciones con otros minerales afecta la flotación del oro. En general, las asociaciones oro-pirita, oro-minerales asociados con cobre no tienen problemas y el oro pueden ser recuperado sin mayores problemas (Bulatovic, 1997). La carencia de buena liberación es un problema y los circuitos de conminución son un elemento clave para Aksoy and Yarar (1989).

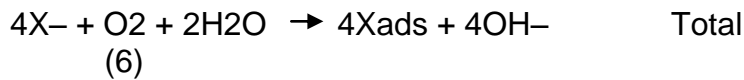
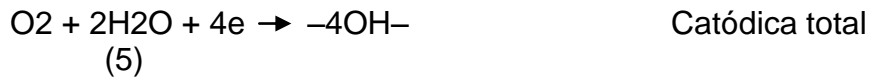
De acuerdo con Teague *et al.*, 1999, los factores que pueden afectar la flotabilidad del oro libre son: el tamaño de la partícula, ausencia de forma de escama, composición, contaminantes superficiales, tipos de colectores y tipo de celda.

Cuando el oro está asociado a sulfuros, su hidrofobicidad es mejorada por la adición de colectores de flotación tales como, xantatos, ditiolfosfatos (DTP) y mercaptobenzotiolatos (MBT). (Cytex, 2002)

Según Woods (1984), el mecanismo por el cual se mejora la hidrofobicidad es similar al de ciertos sulfuros, como la pirita, dado que los iones de xantato son oxidados en la superficie para formar el dímero neutral dixantógeno.

En este caso, Allan y Woodcock (2001), proponen las siguientes reacciones:





Esto muestra que el xantato y el oxígeno son esenciales para la flotación de oro.

La voltametría cíclica ha indicado que el oro puede resultar hidrofóbico ($\theta_{\text{aire}} \approx 50^\circ$) por depositación de una capa superficial de sulfuros desde soluciones de S^{2-} o HS^- . (Gardner y Woods, 1974), Por otra parte, las medidas de carga indican que se requiere de 20 monocapas de sulfuros para producir una superficie de oro hidrofóbica. Este mecanismo puede ser importante en sistemas industriales donde las concentraciones de sulfuro disuelto estén en exceso con respecto a lo requerido y el proceso se halla aplicado a minerales de cobre parcialmente oxidados.

El mecanismo de adsorción física postula que cuando los iones xantato difundidos a través de la solución alcanzan la superficie del oro, se adsorben físicamente orientándose el grupo no polar hacia el seno de la solución. No obstante, este mecanismo no involucra la presencia de oxígeno el cual se sabe necesario (Allan y Woodcock, 2001); de otra parte, el mecanismo de las reacciones simultáneas propone la oxidación anódica del xantato, conjuntamente con la reacción catódica del oxígeno difundido hacia la superficie del oro. El ion xantato se adsorbe químicamente sobre dicha superficie.

Las investigaciones realizadas por Woods *et al.* (1992) para estudiar la respuesta de aleaciones oro-plata a la flotación mostraron que a mayor cantidad de plata presente era más fácil llevar a cabo el proceso y concluyeron que la quimisorción del xantato sobre la superficie del oro podía ocurrir sobre un amplio intervalo de Eh y pH.

Trabajos posteriores realizados por Ihs *et al.* (1993) orientados en el mismo sentido y mediante el estudio de espectros FTIR y XPS, permitieron identificar el xantato quimisorbido como la especie desconocida responsable de los picos observados. El xantato quimisorbido ocurre a potenciales por debajo del potencial requerido para la formación de la fase de xantato metálico e implica uniones químicas entre el radical xantato y la superficie metálica sin la remoción de átomos de sus posiciones en la estructura del metal. (Castro, 2003).

Flotabilidad Natural del Oro Nativo

Considerando el hecho de que el oro nativo y el electrum tienen composición variable (Cornelius, 2001) y diferentes partes de una misma partícula podrían presentar diferentes composiciones, la hidrofobización selectiva de partículas gruesas es compleja. Sin embargo, algunos autores proponen que la recuperación usando flotación espumante de estas partículas es posible debido a que algunas partículas de oro son naturalmente flotables [Marsden and House, 1993, Allan and Woodcock, 2000], lo cual sería favorable a la separación y recuperación

El fenómeno de flotación natural del oro nativo de algunas menas ha sido observado y reportado en la literatura científica desde hace al menos un siglo (Hoover, 1912), pero no existe acuerdo entre las explicaciones diversas dadas a este fenómeno. Gardner y Woods (1974, 1977) llevaron a cabo experimentos con oro electroquímicamente limpiado en su superficie y mostraron que posee un ángulo de contacto cero en soluciones buffer y ninguna flotación natural en soluciones ácidas o alcalinas. (Allan y Woodcock, 2001)

Se ha encontrado que si el oro forma una aleación con una pequeña cantidad de plata o cobre, la adsorción del colector aumenta significativamente [Cytec, 2002,].

Según Chryssoulis y Dimov, 2004, la plata tiene un efecto positivo sobre la flotabilidad del oro, dado que en presencia de plata, la adsorción de ditiofosfatos y monotiofosfatos (DTPI y MTPI) se indica por la formación de los correspondientes complejos de plata (Ag-DTPI y Ag-MTPI) que pueden ser determinados por espectroscopia IR y que conducen a mejorar las condiciones de flotación [Chryssoulis and Dimov, 2004]. Afortunadamente casi todo el oro que se obtiene en forma natural contiene plata, normalmente en el intervalo de 2 al 12%, y esto es suficiente para una buena adsorción de un colector y para la flotación (a menos que la superficie del oro este fuertemente alterada). Cabe añadir que otros elementos como el cobre y el telurio también aparecen frecuentemente asociado al oro nativo y como resultado general, se puede decir que el oro es un mineral que presenta una alta susceptibilidad de ser hidrofobizado selectivamente.

Un aspecto muy importante es la forma de la partícula de oro [Chryssoulis *et al.*, 2003]. Este factor afecta la flotación debido a la que las partículas de oro aplanado tienen una mejor área superficial y pueden reaccionar de manera más eficiente con el colector y su acción fijadora es mucho más lenta comparada con pepitas pequeñas o partículas redondeadas. Por ello la acción trituradora tiene dos acciones importantes, (1) liberar las partículas de oro y (2) crear una superficie adecuada para el colector.

El oro nativo también podría adquirir una flotabilidad por contaminación de su superficie con materia orgánica procedente de procesos biológicos naturales, particularmente en menas de placer, o por contaminación con aceites y grasas

durante su explotación y procesamiento. Las variaciones composicionales del oro nativo han sido involucradas también como responsables de su flotabilidad; en tal sentido, Lepinnen *et al.* (1991) han aportado evidencias de la mayor flotabilidad del oro a medida que su contenido de plata aumenta.

3.2.1.2 El Efecto del Tamaño de Partícula

El tamaño de partícula tiene un gran efecto sobre la recuperación de oro mediante flotación debido a su alta densidad. La flotación es efectiva para partículas de oro en el intervalo de 20-200 μm . Para tamaños más finos la selectividad del oro decrece debido a la flotación de minerales ganga. Para tamaños de partícula más gruesos la flotación debe realizarse con altas densidades de la mezcla (35% sólidos) dado que esto reduce el tamaño de partícula de la sedimentación. (Tomado de Castro S.J, 2003)

Klimpel (1999), realizó un estudio cinético sobre un mineral que contenía oro libre a un pH natural. La prueba fue realizada usando una pequeña cantidad de colector (10 g/t) de etil isopropil tionocarbamato y comparada sin el uso de colector. El mineral fue molido en un tamaño grueso (52.5% < 75 in), con el fin de tener un intervalo amplio de partículas en el alimento al proceso. Estos resultados se ven en la Figura No.3

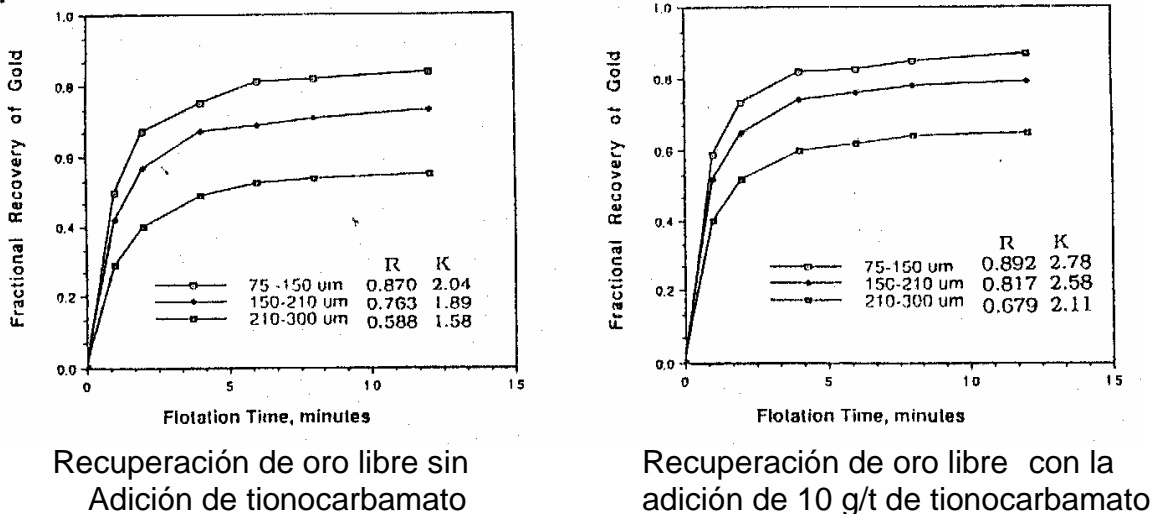


Figura 3-3. Estudio cinético de oro libre (Tomado de Klimpel, 1999).

Las tendencias observadas mostraron que las constantes cinéticas R_{∞} y K son mayores para las partículas más finas de oro, con y sin uso de colector. El uso del

colector en pequeñas cantidades mejora tanto la velocidad de flotación como la recuperación de equilibrio, con un impacto más marcado en las partículas gruesas de oro sobre ambos parámetros (Klimpel, 1999, Castro 2003)

Existe un tamaño de partícula que presenta una mayor recuperación metalúrgica, observándose, en general, una disminución de ésta para tamaños más gruesos y más finos de la mena. La recuperación disminuye para tamaños pequeños, lo cual se relaciona con la dificultad de adhesión partícula/burbuja, dado a que éstas no adquieren la energía cinética suficiente para producir un agregado partícula/burbuja estable. Por otra parte, las partículas pequeñas son arrastradas más fácilmente a la espuma, ya que el drenaje a la pulpa se favorece con el incremento de la velocidad de sedimentación.

Es importante destacar que, en la etapa de flotación primaria (etapa “*rougher*”) la flotación se realiza con una granulometría de mena en la cual no es necesaria la liberación total de las partículas de oro, sin embargo, en la etapa de limpieza donde es necesaria la selectividad de las partículas útiles, es fundamental realizar una remolienda del concentrado de la etapa “*rougher*” para la liberación de las especies útiles de la mena.

De esta manera, el tamaño de partícula es la variable sobre la cual debe ponerse más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final, así como, por la alta incidencia que tiene en los costos de operación del proceso global de concentración. (Pavez, 2005)

En general, se ha encontrado que es posible flotar partículas de oro nativo y electrum tan pequeñas como 2 - 5 μm si se encuentran liberadas, y hasta de 360 μm si presentan forma de hojuelas (Allan y Woodcock, 2001)

3.2.1.3 Selección de Colector y Dosificación.

La función del colector es hacer hidrofóbica la superficie del mineral deseado, por lo cual, es el reactivo químico más importante utilizado en la flotación. La amplia experiencia existente en la flotación de minerales permite usar con eficiencia determinados tipos de colectores dependiendo de los tipos de minerales y asociaciones mineralógicas presentes. (Pavez, 2005).

Jiang *et al.*, (1989), Klimpel, 1999 y otros, han sugerido muchos colectores para la flotación de oro nativo y electrum, pero usualmente se prefieren los xantatos y los ditiofosfatos, o mezclas de ellos. Los xantatos empleados varían desde etil xantato hasta amil xantato, junto con ditiofosfato de sodio, en cantidades desde 50 g/t hasta 200 g/t. En aplicaciones en las que el oro nativo se presenta conjuntamente con oro submicrométrico y en general oro no liberado incluido en sulfuros minerales, la combinación de estos reactivos se ha mostrado eficiente

tanto para la recuperación de los sulfuros como del oro nativo; posteriormente puede aplicarse cianuración a los concentrados para obtener el oro

Algunos otros colectores han sido usados para flotar partículas de oro y electrum, tales como los monotiofosfatos (MTP) obteniéndose resultados similares. Se piensa que los mecanismos de acción de dichos colectores son similares a aquellos de los xantatos. (Cyttec, 2002), (Klimpel 1999)

A pesar del empleo exitoso y ampliamente documentado de los xantatos y ditiofosfatos en la flotación de oro (Woods *et al.* 1994), (Woods *et al.* 1995), (Leppinen *et al.*, 1991), (Allan y Woodcock, 2001), Klimpel (1999) propone el uso de colectores apolares e insolubles en agua tales como los tiocarbamatos, los mercaptanos y los dialquil sulfuros y desaconseja el empleo de los colectores primero mencionados. Argumenta que los xantatos y los ditiofosfatos rebajan la tasa de flotación de todos los minerales naturalmente hidrofóbicos, entre ellos el oro, además de que requieren mayores dosis para lograr la hidrofobicidad. Una razón adicional esgrimida por Klimpel (1999) es la pérdida de la selectividad al usar colectores polares, mientras el uso de colectores no polares preserva la selectividad en la flotación de las especies naturalmente hidrofóbicas.

Las experiencias aportadas por Klimpel (1999) sugieren que las partículas de oro libre pueden recuperarse muy selectivamente, especialmente contra pirita, manteniendo las superficies del oro limpias de lodos y de especies orgánicas, sin el uso de reguladores de *pH* y con pequeñas o cero dosis de colectores apolares. Se debe tener en cuenta, que los reactivos de flotación requieren de un cierto tiempo de acondicionamiento para estar en contacto con la pulpa y de esa forma poder actuar en forma eficiente sobre las especies útiles de la mena. Así, la etapa de acondicionamiento adquiere mucha importancia, ya que algunos reactivos se deben adicionar en la etapa de molienda para tener mayor contacto con la mena, mientras que otros, se adicionan directamente al cajón de descarga de los molinos de bolas o al acondicionador. (Cyttec , 2002)

Debido a efectos sinérgicos se prefiere trabajar con diferentes reactivos y proporción de los mismos [Rao and Forssberg, 1997]. Lotter y Bradshaw aseguran que los beneficios de usar una mezcla de colectores se atribuye al incremento en la capacidad de carga de la fase espumante, una cinética más rápida y una recuperación exitosa de partículas intermedias y gruesas [Lotter & Bradshaw, 2010]. Se infiere que es la interacción entre los componentes del sistema de la mezcla de colectores más que el efecto principal individual es el que domina los beneficios del desempeño, estos a su vez incluyen: el aumento de las recuperaciones y el grado de metal pagado, así como, el incremento en la velocidad del tiempo de recuperación cuando se usan las dosis más bajas de reactivos. Lotter & Bradshaw, 2010, sugieren que la determinación de las proporciones de los reactivos se haga de acuerdo a un diseño de experimentos tipo factorial con replicas y control de calidad como pueden ser pruebas de

flotación de alta confianza]. Antes de definir la proporción de los colectores es importante definir su rol en la flotación [Pearse, 2005].

3.2.1.4 Selección del Espumante

La elección de un espumante determina las características de la espuma, que contribuye a la selectividad de la operación. Se adicionan con el objeto de; 1) Estabilizar la espuma, 2) disminuir la tensión superficial del agua, 3) Mejorar la cinética de interacción burbuja – partícula, 4) Disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia). La altura de la espuma y el flujo de aire a la celda afectan el tiempo de retención de las partículas en la espuma. La estabilidad de la espuma depende principalmente de la dosificación del espumante. Los espumantes utilizados comúnmente en la flotación de oro nativo y electrum son aceite de pino, ácido cresílico, el MIBC (metil isobutil carbinol) y los oligómeros propileno glicol como el Aerofroth 65 (Broekman *et al.*, 1987); colectores tales como el ditiofosfato líquido proveen también poder espumante a la pulpa mineral.

Las experiencias industriales reseñadas en diferentes fuentes (Klimpel, 1999), (Allan y Woodcock, 2001), (Teague *et al.*, 1999), aportan a favor del uso de combinaciones de diferentes componentes de espumantes, con el objeto de maximizar la efectividad en la flotación de un amplio intervalo de tamaños de partículas. Allan y Woodcock (2001) establecen que la mezcla de espumantes es ahora una práctica común dependiendo de la fortaleza y compacidad que se requieran en la espuma.

Para la flotación de oro nativo se recomiendan espumantes fuertes y estables.

Un requisito importante de un espumante es que no compita con los colectores disminuyendo la energía libre superficial de las partículas minerales y por lo tanto, si un espumante actuara como colector se reduciría la selectividad del colector en uso. (Klimpel, 1999, Cyttec, 2002)

3.2.1.5 El Uso de Activadores

Para la flotación de oro nativo que presenta superficies limpias no se requiere adicionar activadores, no obstante eventualmente puede requerirse activación cuando existen recubrimientos en las partículas de oro u oro asociado con pirita recubierta. En tales casos suele emplearse sulfato de cobre, carbonato de sodio (el cual precipita calcio e iones de metales pesados), sulfuro de sodio en dosis controladas cuidadosamente, y dióxido de azufre (Allan y Woodcock, 2001).

Los activadores son sales de metales base cuyo ion metálico se adsorbe sobre la superficie de las partículas minerales modificando sus propiedades químicas superficiales; como consecuencia, puede extenderse el intervalo de pH para la flotación mineral, y se incrementan la velocidad de flotación, la recuperación y la selectividad.

De otro lado existen ligandos que pueden formar complejos solubles con metales nobles como el oro en soluciones acuosas. Históricamente el ion CN^- es el ligando usado en la disolución de oro, otros ligandos que cumplen con dichas funciones son aquellos que contienen azufre, halógenos y N. Entre estos, los ligandos que contienen azufre son los más empleados para la recuperación de oro mediante flotación [Nagaraj et. al., 1992]. Se sabe que los metales nobles tienen una gran afinidad por los ligandos que contengan azufre y que sean más polarizables (bases suaves) que los ligandos que contienen oxígeno.

Debido a efectos sinérgicos, se prefiere trabajar con diferentes reactivos y proporción de los mismos (Rao and Forssberg, 1997).

Lotter y Bradshaw, 2010, aseguran que los beneficios de usar una mezcla de colectores se atribuye al incremento en la capacidad de carga de la fase espumante, una cinética más rápida y una recuperación exitosa de partículas intermedias y gruesas [Lotter & Bradshaw, 2010]. Se infiere que es la interacción entre los componentes del sistema de la mezcla de colectores más que el efecto principal individual es el que domina los beneficios del desempeño, estos a su vez incluyen: el aumento de las recuperaciones y el grado de metal pagado, así como, el incremento en la velocidad del tiempo de recuperación cuando se usan las dosis más bajas de reactivos. Lotter y Bradshaw sugieren que la determinación de las proporciones de los reactivos se haga de acuerdo a un diseño de experimentos tipo factorial con replicas y control de calidad como pueden ser pruebas de flotación de alta confianza [Lotter & Bradshaw, 2010]. Antes de definir la proporción de los colectores es importante definir su rol en la flotación [Pearse, 2005].

3.3 Físicoquímica de interfaces en la flotación de Au-nativo

Para comprender los procesos de concentración de minerales, como la flotación, es indispensable estudiar las propiedades fisicoquímicas de las propiedades de los minerales, así como, las relaciones e interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa y las interfaces que se dan entre ellas.

La heterogeneidad mineralógica de las partículas de un mineral puede tener un efecto significativo sobre las propiedades superficiales de las partículas. La forma de la partícula y la topografía de su superficie, que pueden variar de un mineral a otro, afectan las propiedades de las superficies.

Debe considerarse además que la estructura cristalina de una partícula mineral termina bruscamente en la superficie de la partícula. Como consecuencia, los átomos que se encuentran en la superficie de la estructura del cristal deben lograr el equilibrio con su medio circundante. En un sistema acuoso, los átomos de la superficie deben estar en equilibrio con los iones que existen en solución, y como

estos iones pueden ser controlados, es posible controlar la naturaleza química de la superficie del mineral.

La interface mineral-solución es la más importante en el procesamiento de minerales, por ello se consideran dos aspectos: la termodinámica de la adsorción sobre las superficies minerales y en las interfaces aire-agua, y la termodinámica que controla la adherencia de las partículas de mineral a las burbujas de aire. (Castro y Garcia, 2003)

Adsorción en las interfaces: la adsorción en una interface se describe por medio de la ecuación de adsorción de Gibbs, representada mediante la ecuación:

$$d\gamma = -E_s dT - \sum_{i=1}^i \Gamma_i d\mu_i \quad (7)$$

Esta ecuación (7) relaciona la tensión interfacial a cualquier temperatura T con el potencial químico μ_i de las diversas especies en la masa y la superficie en exceso o densidad de adsorción Γ_i de esas especies. La superficie en exceso es la concentración en exceso en la interface respecto a la que sería de esperarse si la fase de solución fuera de concentración uniforme hasta la línea divisoria entre las dos fases.

Considerando que la temperatura se mantiene constante y no hay exceso de superficies de agua, se tiene la ecuación;

$$d\gamma = - \sum_{i=1}^i \Gamma_i d\mu_i \quad (8)$$

Donde, el potencial químico μ_i de una especie en solución se relaciona con la actividad \mathcal{A}_i de esa especie mediante la ecuación (9).

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \mathcal{A}_i \quad (9)$$

Por lo tanto la ecuación (8) se puede escribir de acuerdo a la ecuación

$$\Gamma_i = - \frac{1}{RT} \frac{\partial \gamma}{\partial \ln \mathcal{A}_i} \quad (10)$$

Para la adsorción en una interface de una sola especie y a temperatura constante, la ecuación (10) se puede escribir como la expresión:

$$\Gamma_1 = - \frac{1}{RT} \frac{d\gamma}{d \ln C_1} \quad (11)$$

A una baja concentración A_i se puede aproximar a la concentración de masa C_1 .

Si un ion o molécula es adsorbida en la interface aire-agua (es decir que tiene una densidad de adsorción positiva), se dice que es hidrofóbico. Si el ion o molécula no es adsorbido en la interface (es decir, si tiene densidad de adsorción negativa) se dice que es hidrofílico.

En el proceso de flotación es de particular interés la adsorción en la interface aire-agua y la adsorción en la superficie de los minerales en agua. Para determinar cuantitativamente el grado de adsorción de los espumantes en la interface aire-agua, puede usarse la ecuación de adsorción de Gibbs, la cual determina la el comportamiento de la isoterma de adsorción.

Los colectores difieren de los espumantes en que generalmente son electrolíticos, de manera que debe considerarse también la adsorción de las especies iónicas en la interface aire-agua.

La doble capa eléctrica: (Castro y Garcia, 2003). La adsorción que tiene lugar en la superficie de una partícula mineral es regulada en gran medida por la naturaleza eléctrica de esa superficie.

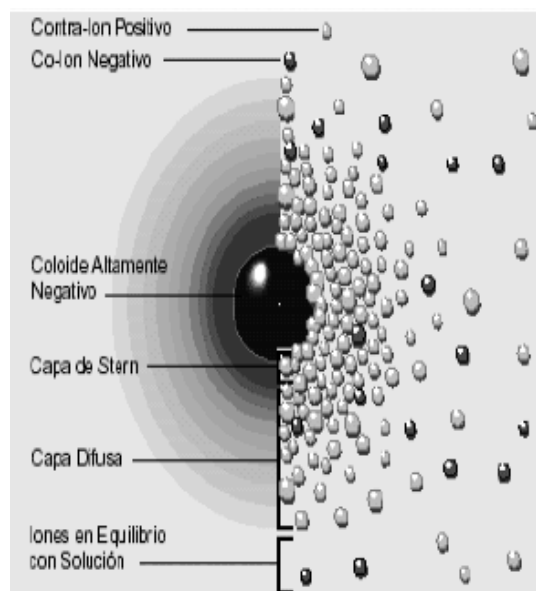


Figura 4-3. Doble capa eléctrica (Tomado de ZETA-METER INC, 1998)

Si una especie iónica es adsorbida en una interface, entonces también deben adsorberse contraiones por la electroneutralidad. La figura 4 ilustra la doble capa eléctrica también conocida como el modelo de Stern de la doble capa eléctrica. .

Los iones que son quimiadsorbidos en la superficie mineral establecen la carga de superficie y se les llama iones determinantes de potencial. La densidad de

adsorción de los iones determinantes de potencial de la superficie mineral determina la carga de superficie en un mineral.

La actividad de los iones determinantes de potencial al que la carga de superficie es igual a cero se llama el punto de carga cero del mineral. Cuando los iones H^+ y OH^- son determinantes del potencial, el punto de carga cero se expresa en función del pH.

Hidrofobicidad: El objetivo en la flotación es reducir la atracción entre los minerales valiosos y el agua, es decir, reducir la mojabilidad e incrementar la hidrofobicidad. La mojabilidad puede medirse mediante el ángulo establecido cuando una gota de agua se sitúa sobre la superficie del mineral. Si el agua se esparce sobre la superficie entonces el ángulo de contacto es alto y la superficie se denomina hidrofílica. Por otra parte, si no hay esparcimiento de agua y se forman gotas de la misma, entonces el ángulo de contacto es bajo y la superficie se denomina hidrofóbica.

Se presentan dos aproximaciones que hacen uso de teorías de hidrofobicidad, las cuales en la actualidad proviene de dos fuentes, principalmente:

1. De la teoría de flotación que hace uso los potenciales mixtos, en la cual se genera una coadsorción de partículas coloidales tales como dixantógeno en la interface oro-agua, y el cual es un fenómeno controlado electroquímicamente, mediante las reacciones redox de reducción de oxígeno y oxidación del agente colector.
2. La teoría de DLVO extendida, la cual asume que una fuerza hidrofóbica aparece en la interface, además de la clásica de interacción de London y de repulsión/atracción; y controla fuertemente la hidrofobicidad.

La actividad de una superficie mineral en relación a los reactivos de flotación en el agua depende de las fuerzas que actúan en la superficie. Para que sea factible la flotación de partículas más densas 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.

Angulo de contacto: el ángulo de contacto es una medida de la mojabilidad de la superficie sólida por un líquido e indica los parámetros superficiales que se necesitan medir. Es muy importante porque relaciona en forma cuantitativa las propiedades hidrofóbicas de un mineral con su flotabilidad. El ángulo de contacto es el ángulo formado por el plano tangente a la interface liquido-gas y el plano formado por el sólido en un contacto trifásico sólido-líquido-gas. En la figura 5, se muestra una representación de las tensiones interfaciales en equilibrio.

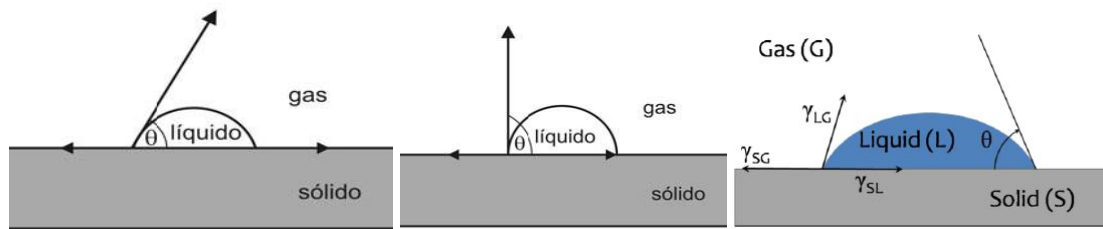


Figura 5-3. Representación esquemática de una gota de líquido (L) reposando en equilibrio sobre una superficie sólida horizontal (S) en una atmosfera de gas (G). Ángulo de contacto y tensiones en el punto triple.
(Tomado de Castro y Garcia, 2003)

Las energías interfaciales de las tres fases se relacionan por la ecuación de Young, representada por la ecuación (12):

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta \quad (12)$$

La energía libre en función de ángulo de contacto se relaciona con la ecuación de Young-Dupré, como puede verse en la ecuación (13):

$$\Delta G = \gamma_{LG} (\cos\theta - 1) \quad (13)$$

Si el líquido es atraído fuertemente por la superficie sólida (por ejemplo agua sobre un sólido hidrófilo) la gota se extenderá completamente por el sólido y el ángulo de contacto será aproximadamente 0°. Para los sólidos que sean menos hidrófilos el ángulo de contacto puede variar entre 0° y 30°. Si la superficie del sólido es hidrófoba el ángulo de contacto será mayor que 90°. En superficies muy hidrófobas el ángulo puede ser mayor a 150° e incluso cercano a 180°.

En los procesos de flotación es importante determinar el ángulo de contacto entre las superficie aire-mineral-agua, debido a que este parámetro determina la adsorción preferencial de reactivos de flotación que conducen a que una superficie hidrofóbica sea separada de una superficie hidrofílica.

Normalmente, el parámetro que suele emplearse para determinar el balance de fuerzas en las interfaces, es la tensión superficial el cual se usa en la llamada ecuación de Young, la cual está fuertemente unido a los potenciales de superficie (Castro, 2003).

Se ha demostrado que la energía libre de la delgada capa que separa una partícula y una burbuja, puede cambiar a medida que la burbuja se aproxima a la superficie del mineral, debido a que el proceso de adhesión de una partícula sólida a una burbuja durante el proceso de flotación se realiza en tres etapas:

- El acercamiento de la burbuja a la partícula debido a turbulencia o atracción entre ambas: predomina la hidrodinámica del proceso de flotación. En esta etapa la película de agua (película de desunión) es completamente estable, su energía libre se incrementa a medida que la burbuja se aproxima al mineral.
- El adelgazamiento de la película de agua entre la burbuja y la partícula hasta la ruptura: predomina la intervención de las fuerzas moleculares como las de Van der Waals y eléctricas, que se originan de la interacción de las dobles capas que hay en torno a las partículas y de hidratación de cualquier grupo hidrofílico existente sobre la superficie de la partícula. En esta etapa la película de agua es completamente inestable, la energía libre de la misma disminuye a medida que la burbuja se aproxima a la superficie del mineral.
- Ruptura de la película de agua entre la burbuja y el sólido para establecer finalmente el equilibrio de contacto: se define el ángulo de contacto.

La fuerza necesaria para romper la interface partícula – burbuja es el llamado trabajo de adhesión W_{adh} , y es igual al trabajo necesario para separar la interface sólido – aire y produce las interfaces separadas aire – agua y sólido – agua.

Es claro plantear a partir de esta relación, que el proceso de adhesión partícula – burbuja es factible termodinámicamente, si el ángulo de contacto entre la burbuja y la superficie del mineral es mayor a cero. Mientras mayor sea el ángulo de contacto más grande será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja; además el sistema es más elástico ante las fuerzas de rompimiento. La flotabilidad de un mineral aumenta con el incremento del ángulo de contacto y se dice que los minerales con alto ángulo de contacto son aerofílicos [King, 1982] (o equivalentemente hidrófobos), es decir que tienen mayor afinidad por el aire que por el agua.

El ángulo de contacto θ , se puede aumentar mediante el uso de sustancias tensoactivas que forman una película hidrófoba alrededor de las partículas. Tales sustancias poseen en sus moléculas una parte no polar (hidrófoba) que es atraída por las burbujas de aire en ascensión y otra polar (hidrófila), que es atraída por la fase dispersa. El empleo de sustancias espumantes también ha sido recomendado para formar una mezcla más estable de burbujas y partículas, tales sustancias tienen, además, la propiedad de reducir el tamaño de las burbujas de aire, aumentando la superficie específica de las mismas, para proporcionar mayor capacidad de absorción y tiempo de contacto, ya que burbujas de aire pequeñas poseen menores velocidades de ascenso.

Como puede verse, la flotación compromete fuertemente la superficie mineral bajo la acción de tensoactivos que controlan la energía libre superficial de las partículas, y en medio de un ambiente cargado de burbujas controlado a su vez

por la presencia de otros tensoactivos denominados espumantes que interactúan en la interface líquido-aire y conjuntamente permiten la flotación de partículas que cargan una espuma, la cual es retirada de la cámara donde se efectúa el proceso, denominada celda de flotación.

Ahora bien, todas estas respuesta tiene que ver con la tensión superficial en las interfaces y en la modernidad, se subdividido la tensión superficial de una partícula en varias componentes, una componente de dispersión, debido a fuerzas débiles de interacción de London, una componente iónica debida a enlaces químicos en la interface y una componte de hidrofobicidad debida a fuerzas hidrofóbicas y/o hidrofílicas en la interface

Variables de operación relevantes del proceso de flotación

- **Granulometría:** Adquiere gran importancia dado que la flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración.
- **Tipo de Reactivos:** Los reactivos pueden clasificarse en colectores, espumantes y modificadores. La eficiencia del proceso dependerá de la selección de la mejor fórmula de reactivos.
- **Dosis de Reactivo:** La cantidad de reactivos requerida en el proceso dependerá de las pruebas metalúrgicas preliminares y del balance económico desprendido de la evaluación de los consumos.
- **Densidad de Pulpa:** Existe un porcentaje de sólidos óptimo para el proceso que tiene influencia en el tiempo de residencia del mineral en los circuitos.
- **Aireación:** La aireación permitirá aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación o de la ley, respectivamente. El aire es uno de los tres elementos imprescindibles en el proceso de flotación, junto con el mineral y el agua.
- **Regulación del pH:** La flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Cada fórmula de reactivos tiene un pH óptimo ambiente en el cual se obtendría el mejor resultado operacional.
- **Tiempo de Residencia:** El tiempo de residencia dependerá de la cinética de flotación de los minerales de la cinética de acción de reactivos, del volumen de las celdas, del porcentaje de sólidos de las pulpas en las celdas y de las cargas circulantes.
- **Calidad del Agua:** En las Plantas la disponibilidad de agua es un problema. Normalmente se utiliza el agua de recirculación de espesadores que contiene cantidades residuales de reactivos y sólidos en suspensión, con las consecuencias respectivas derivadas por este flujo de recirculación.

3.4. Tecnologías del proceso de flotación usadas en esta investigación.

Tecnológicamente, se pueden usar tanto celdas convencionales como en celda flash, siendo esta última una innovación introducida recientemente en la descarga de las moliendas primarias para recuperar el oro grueso que ya ha alcanzado su liberación. Para fines de investigación de carácter básico se emplean celdas de flotación muy pequeñas, la más empleada es la celda o tubo Hallimond.

3.4.1 Tubo Hallimond

Las pruebas de flotación en la celda Hallimond, consisten en micro flotaciones, que permiten encontrar una tendencia en cada una de las variables analizadas para poder realizar las pruebas de flotación en celda de flotación convencional y posteriormente en la celda flash. Estas microflotaciones se realizan solamente con partículas de oro y el rendimiento se determina por conteo de partículas recuperadas

Los resultados de estas pruebas nos permiten establecer el comportamiento en flotación selectiva de oro, de los diferentes colectores preseleccionados según lo establecido en la literatura. En la figura 6 se presenta el arreglo del tubo Hallimond para las microflotaciones.

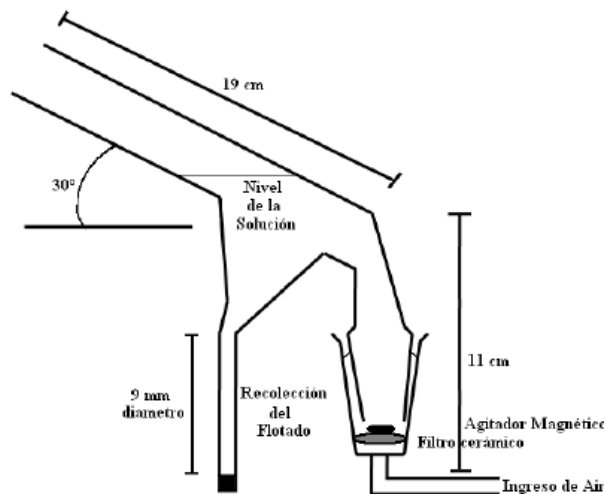


Figura 6 - 3. Representación de la celda Hallimond (Tomado de Mackinnon 1988)



Figura 6.1-3 Microflotaciones en celda Hallimond con partículas de oro.
(Foto de montaje en el I.M. CIMEX de la Universidad Nacional)

3.4.2 Celda Denver

La celda de flotación Denver, consta de mecanismos de inyección de burbujas de aire y de mantenimiento en suspensión de las partículas. El volumen de las celdas varía desde 2 a 3000 pies cúbicos e incluso más grandes. El tiempo de flotación es el tiempo promedio de retención de las partículas en la celda. Es el tiempo suficiente para que las partículas hidrófobas se adhieran a las burbujas de aire y floten a la superficie. Este tiempo puede variar desde algunos segundos hasta varios minutos. El porcentaje de sólidos en peso es también muy importante y éste puede estar entre 15 y 40 %. El tamaño de las partículas depende del grado de liberación. En la práctica este tamaño fluctúa entre 65 mallas Tyler hasta aproximadamente 10 micrones. Los ensayos en celda Denver permiten obtener las bases para poder diseñar ensayos a mayor escala, determinar comportamiento de reactivos e índices de flotabilidad de menas. En la figura 7 se esquematiza una celda Denver.

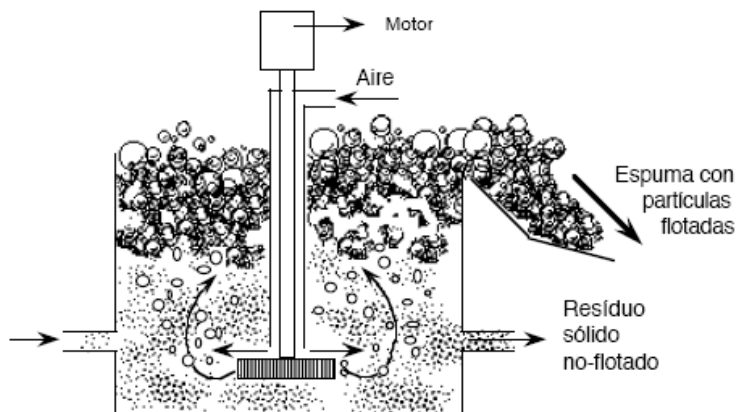


Figura 7-3.Celda de flotación Denver (Tomado de castro y Garcia , 2003)

3.4.3 Flotación Flash

AutoKumpu desarrolló una celda modificada de flotación en la década de los 80, la cual llamo “skim-air flotation o flash flotation”, la cual consistió en una celda para separar minerales fácilmente flotables en la descarga de molinos. Esta técnica en la actualidad se usa para la concentración rápida de minerales que hayan alcanzado su liberación en las descargas de los clasificadores, incrementando la recuperación global de las plantas y cuyo objetivo principal es evitar la sobre molienda de minerales liberados y que retornan en las corriente de recirculación al molino.

La flotación Flash se define como la flotación instantánea de partículas valiosas desde un circuito de molienda-clasificación.

Se considera el uso de la flotación flash en las siguientes circunstancias, estas son:

- (1) Los minerales valiosos tienen liberación suficiente respecto de la ganga, y
- (2) los minerales valiosos a recuperar tienen alto peso específico en comparación a las gangas y tienen la tendencia a concentrarse en las cargas circulantes de molienda. (Villegas and Manzaneda, 2006).

Seguidamente se presentan los parámetros de operación de la flotación flash.

Parámetros de operación de la flotación flash:

- * Densidad de pulpa en la alimentación de la celda
- * Tonelaje de alimentación
- * Caudal de aire
- * Altura de espumas

- * Reactivos de flotación

Ventajas de la flotación flash:

- * Menor remolienda de valores.
- * Incremento de la recuperación típica.
- * Mejor humedad de concentrados.

La flotación flash no es exclusivamente de la minería de oro, pues se puede utilizar en la recuperación de minerales de platino, plata y algunos sulfuros metálicos.

Este tipo de celdas implican que la cinética de la flotación sea relativamente alta y los reactivos sean selectivos en la hidrofobización de minerales de Au-Ag, y de Au-Ag.

En Colombia la introducción de este sistema conduciría a los siguientes beneficios:

- Eliminación directa del uso del mercurio
- Incremento de la recuperación global de Au
- Disminución de costos de operación y finalmente
- El uso de uno o varios reactivos específicos para la flotación selectiva de oro.



Figura 8 -3 .Celda de flotación Flash. (Tomado de Outokumpu, 2004)

3.4 Mecanismo de hidrofobización selectiva a la luz de la teoría de potenciales mixtos y quimisorción de reactivos.

Los mecanismos de como se adsorbe el colector sobre las superficie de los minerales y como se logra la hidrofobización, constituye un objetivo básico en la teoría de la flotación.

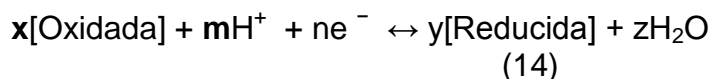
Esta hidrofobicidad esta controlada por un proceso de oxido-reducción, que se puede explicar baja la teoría electroquímica o del y potencial mixto. (Woods, 1988)

La teoría electroquímica Contempla: (Castro y García, 2003)

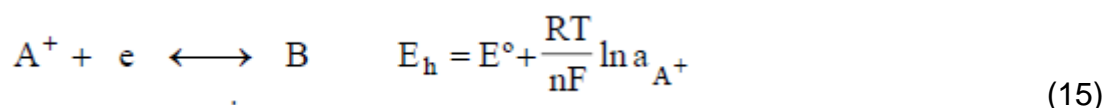
- Rol del oxígeno.
- Oxidación del colector.
- Naturaleza mixta ($X^- + X_2$) durante la hidrofobización

Potencial de Equilibrio: Cuando tiene lugar una reacción sobre un electrodo, el potencial queda determinado por la transferencia de carga entre el electrodo y la solución. Para una reacción única en el equilibrio, el potencial queda dado por la ecuación de Nernst.

Así, para una reacción redox cualquiera, el mecanismo puede representarse a través de la siguiente reacción general:



Para el caso más simple:



La cual corresponde a la Ecuación de Nernst.

Potencial Mixto: Cuando ocurren simultáneamente sobre la superficie del electrodo dos o mas reacciones, entonces el potencial de electrodo a corriente cero, corresponde al potencial mixto. (Castro y García, 2003)

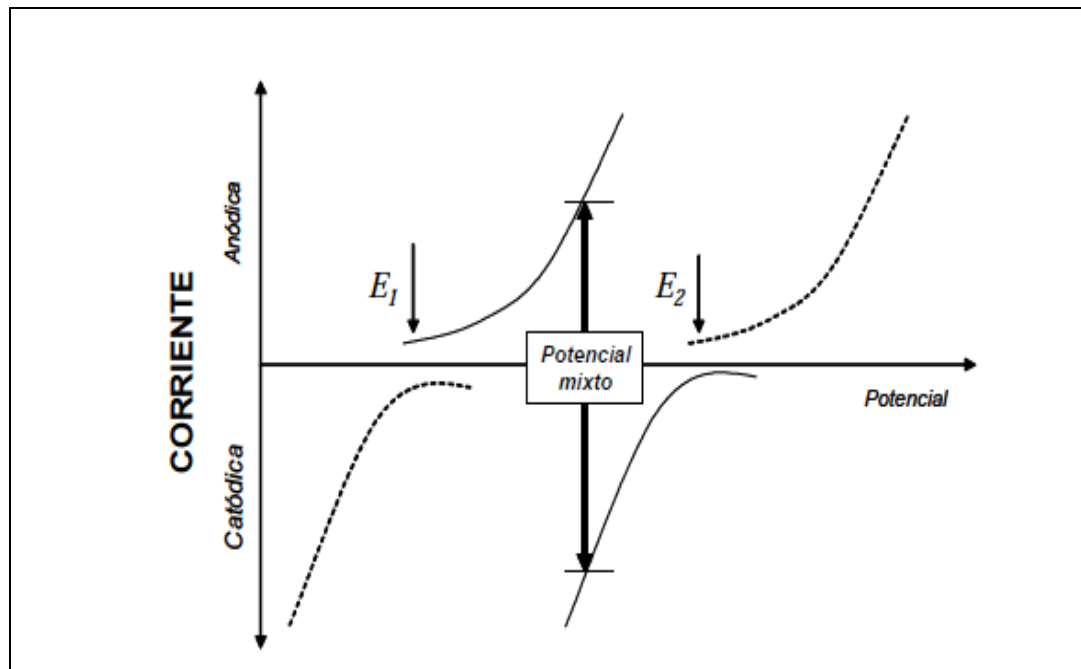
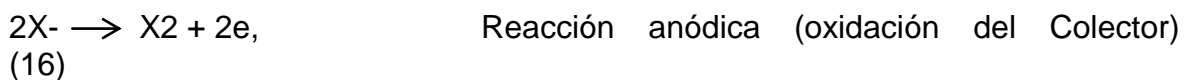


Figura: 9-3 Representación esquemática de curvas corriente-potencial, mostrando los potenciales reversibles de un par de reacciones redox acopladas y el potencial mixto cuando está presente el acople. (Tomada de Castro y García, 2003).

E_1 y E_2 en la Figura 9 son potenciales reversibles de dos reacciones acopladas y corresponden al equilibrio entre la reacción hacia adelante y la reacción reversible en cada uno de los procesos anódico y catódico. Cuando está ocurriendo la reacción redox, el potencial alcanza un valor en cada uno de los dos procesos y a su vez la corriente es de magnitud igual pero de sentido contrario, por lo cual la carga neta a través del proceso es nula. Este potencial se denomina Potencial Mixto, y es un indicativo de que la reacción global está ocurriendo.

Woods, plantea que el mecanismo sea dado por un proceso electroquímico, mediante las reacciones redox de reducción de oxígeno y oxidación del agente colector, es decir:



Y la expresión para el potencial redox está dada por:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{X_2}}{(a_{X^-})^2}$$

La ecuación (16) corresponde a una reacción anódica, por lo que dentro del sistema debería haber también una semireacción catódica, que debería corresponder a la reducción del oxígeno.



Reacción global:



Woods utiliza la voltametría para demostrar que el mecanismo de oxidación del Xantato es electroquímico. Para ello se pueden usar electrodos de metales nobles (Au, Pt) o electrodos minerales (SPb, Cu₂S, etc.) (que son semiconductores).

Lo hace a través del uso de Potenciostato para generar un voltagrama. (Castro y García, 2003)

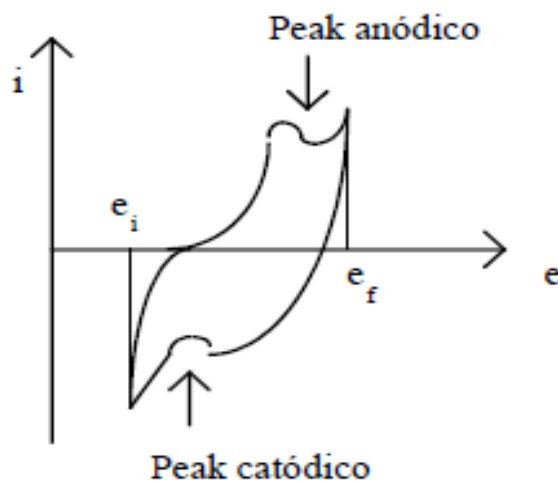


Figura 10-3. Voltagra (Tomado de Castro y Garcia, 2003)

Elige potencial entorno del potencial de la cupla X-/X₂ y comienza a barrer con potencial, de modo que cuando se llega al potencial de formación del dixantógeno, se produce hidrofobicidad (por lo tanto de flotación). (Castro y García, 2003)

De otro lado la voltametría cíclica da más información química acerca de la superficie del mineral. La voltametría de los minerales individuales muestra los potenciales a los cuales ocurre la oxidación y la reducción de la superficie mineral. A partir de estos datos se puede inferir los compuestos presentes sobre la superficie del mineral. La adsorción del colector xantato mediante sulfuros

comúnmente ocurre por reacciones redox, además la voltametría de sulfuros en presencia de un colector indica las condiciones óptimas para la adsorción del colector.

La voltametría cíclica ha indicado que el oro puede resultar hidrofóbico ($\theta_{\text{aire}} \approx 50^\circ$) por deposición de una capa superficial de sulfuros desde soluciones de S^{2-} o HS^- . Por otra parte las medidas de carga indican que se requiere de 20 monocapas de sulfuros para producir una superficie de oro hidrofóbica.

En la siguiente tabla se muestran los valores de potenciales estándar para algunos colectores tipo Dialquil ditiofosfatos.

Tabla 3 -3. Potenciales estándar de los alquil Ditiofosfatos.

Alquil ditiofosfato	E° , V
Dimetil ditiofosfato	0,315
Diethyl ditiofosfato	0,255
Dipropil ditiofosfato	0,187
Dibutil ditiofosfato	0,122
Diamil ditiofosfato	0,050
Dihexil ditiofosfato	-0,015
Di-isopropil ditiofosfato	0,196
Di-isobutil ditiofosfato	0,158
Di-isoamil ditiofosfato	0,086

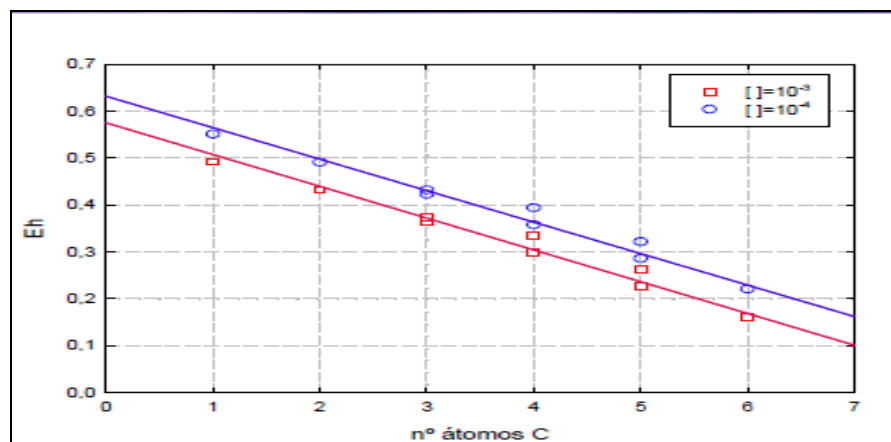


Figura 11-3. Potenciales E_h versus n° átomos de C de Diferentes alquil ditiofosfatos (Tomado de Castro y García, 2003)

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Caracterización del mineral

El mineral usado en las pruebas, fue facilitado por la mina San Nicolás del municipio de Segovia. Se trabajo con un mineral de sulfuros que contenían oro libre y la muestra fue tomada a la descarga del molino primario.

La Mina san Nicolás corresponde al distrito minero de Segovia – Remedios, importante distrito minero de depósitos vetiforme de oro y de plata dentro de un intrusivo monzonítico granodiorítico (Batolito de Segovia), cuya edad se ha dado como Jura-Triásico. (Ortiz, F, 1992).

- **Humedad: 3.2 %**
- **Pruebas de densidad:**
 - a) **Densidad aparente (medida con Bureta): 2.717 gr/ ml**
 - b) **Densidad real (Medida con Picnómetro) : 2.5776 g**

De acuerdo a la composición del mineral, tenemos en cuenta que esta compuesto por sulfuros (pirita) y cuarzo. La densidad del cuarzo es: 2.67 gr/ml y la densidad de la pirita es aprox. 3 gr/ ml. Según lo anterior la densidad de nuestro mineral, debe encontrarse en este rango.

- **Análisis granulométrico**

Tabla 4-4. Análisis granulométrico mineral de prueba.

Abertura (µm)	Malla Tyler (#)	Peso Ret. (g)	Peso Acum (g)	Retenido (%)	Ret. Acum (%)	Pasante Acum (%)
+850	+ 20	19,9	19,9	5,5	5,5	94,5
-850 + 600	- 20 + 30	27,6	47,5	7,7	13,2	86,8
	- 30 + 40	13,0	60,5	3,6	16,8	83,2
	- 40 + 50	39,3	99,8	10,9	27,8	72,2
	- 50 + 70	39,2	139,0	10,9	38,7	61,3
	- 70 + 100	38,5	177,5	10,7	49,4	50,6
	- 100 + 140	69,6	247,1	19,4	68,7	31,3
	-140	112,4	359,5	31,3	100,0	0,0

El d_{80} del material en la descarga del molino se encuentre aprox. en **410 μm**
(Grafica de ROSIN- RAMMLER)

- **Análisis químico**

	(%)
FeS ₂	77,017
PbS	0,777
ZnS	0,418
CuFeS ₂	0,067
Insolubles	19,633
Total	<u>97,912</u>

Las pérdidas por ignición, deberán dar cercanas a 41,392% asociadas al azufre.

- **Determinación de oro libre susceptible de ser flotado en celda flash**

Para buscar el oro libre susceptible de ser flotado, se realizo un ensaye al fue No convencional. Este es un método que se esta desarrollando en el IM. CIMEX, y es aplicado cuando se requiere conocer si el mineral tiene o No oro libre.

Consiste en la utilización de la batea convencional para concentrar mineral por diferencias de peso (concentración gravimétrica).

Este ensaye al fuego no convencional tiene la particularidad de realizar el ensayo por tamaños para las muestras procedentes del bateo.

Para poder analizar el comportamiento de la muestra, es decir, la cantidad de oro en cada tamaño y el efecto pepita que produce la presencia de oro libre en la muestra, se recoge toda la información en la siguiente tabla que muestra las distribuciones de oro en las corrientes de concentrado y colas del bateo, en la tabla 5.

Dado las diferencias en los tenores entre el ensaye al fuego convencional y no convencional, existe un efecto pepita sobre la muestra del ensaye al fuego no convencional, lo que significa que la muestra posee oro libre.

La mayoría del oro libre (el 60% aproximadamente) se encuentra en el rango de tamaño -48+100 mallas.

Tabla 5-4. Distribuciones de oro en las corrientes de concentrado y colas del bateo. Ensaye al fuego No convencional.

Código Muestra	Au Total (g)			Au Total (%)		
	Muestra	Concentrado	Colas	Muestra	Concentrado	Colas
+ 48	0,037843861	0,0081037	0,02974016	100	21,4	78,6
+48	0,035235777	0,0081037	0,02713208	100	23,0	77,0
+48'	0,020638396	0,0123404	0,008298	100	59,8	40,2
+48'	0,039345282	0,0123404	0,02700488	100	31,4	68,6
- 48 +100	0,01079094	0,00688243	0,00390851	100	63,8	36,2
-48 + 100	0,011634075	0,00688243	0,00475164	100	59,2	40,8
-48 + 100'	0,015059789	0,0099069	0,00515289	100	65,8	34,2
-48 + 100'	0,014737251	0,0099069	0,00483035	100	67,2	32,8

4.2 Caracterización fisicoquímica de la superficie de oro.

Con el fin de determinar la Hidrofobicidad selectiva de las partículas de Au y Ag que se encuentran en la descarga de los molinos primarios, se realizó la medición de algunas propiedades Fisicoquímicas:

- **Angulo de contacto:** con el fin de verificar el ángulo de contacto en la superficie del oro, se hicieron mediciones a cuatro placas diferentes. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6-4. Medidas del ángulo de contacto a una superficie de Au nativo.

Muestra	Ángulo de contacto (grado)
Original	46,18
Blanco 1	43,73
Blanco 2	44,47
Blanco 3	42,4

Las figuras 12 y 13, muestran una foto de la formación de la gota en la superficie del oro con y sin tensoactivo.

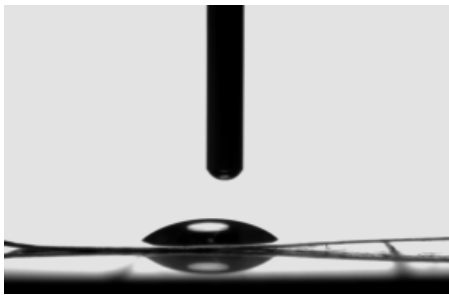


Figura 12-4 Fotografía de las mediciones de ángulo de contacto, sobre una placa de oro ley 999 sin colector.

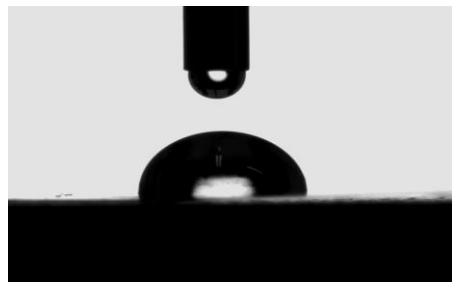


Figura 13-4. Fotografía de las mediciones de ángulo de contacto, sobre una placa de oro ley 999 colectada por 20 minutos con DPM.

- **Potencial zeta**

Con el fin de medir el comportamiento fisicoquímico superficial de la partícula y su carga, se realizaron mediciones de potencial z a diferentes pH. De esta manera se pudo comprender qué tipo de iones se absorbe y además nos permitió determinar la capacidad de interacción con los grupos iónicos del agua y con los surfactantes en solución acuosa.

El potencial zeta está determinado por la naturaleza de la superficie de la partícula y el medio de dispersión, es por esto que el pH es un parámetro importante.

- * **Medición de Potencial Z para Oro a diferentes tiempos de estabilidad y diferentes pH**

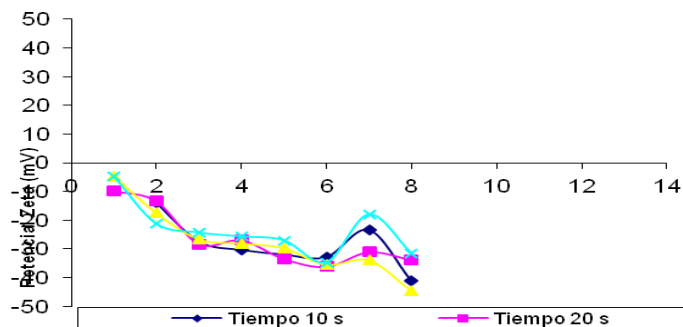


Figura 14-4. Lecturas de Potencial Z para Oro a diferentes tiempos de estabilidad y diferentes pH

Según los resultados mostrados en la figura 14, es claro que en la región de estabilidad del agua (PH entre 0 y 14), las partículas de oro presentan un potencial zeta por debajo de cero para las mediciones de PH realizadas. Además, aunque para los valores medidos de pH no se llega al punto isoeléctrico, es decir el valor de pH para el cual el potencial zeta es cero, se observan una región (potencial zeta entre 0 y -30mV) en la que podríamos decir que la partícula de oro es inestable y es susceptible de ser colectada por un tensoactivos en la flotación.

Es entonces claro que se debe usar un colector para la hidrofobización de esta partícula y se realizan pruebas de medición de potencial zeta con diferentes colectores, con el fin de encontrar el valor de pH al cual el colector actúa sobre la superficie de la partícula para hidrofobizarla.

*** Medición de Potenciales Zeta de partículas Auríferas y sus Minerales acompañantes en pH Básicos.**

En la siguiente figura se muestra la medición del potencial zeta para oro, pirita y galena a diferentes pH básicos.

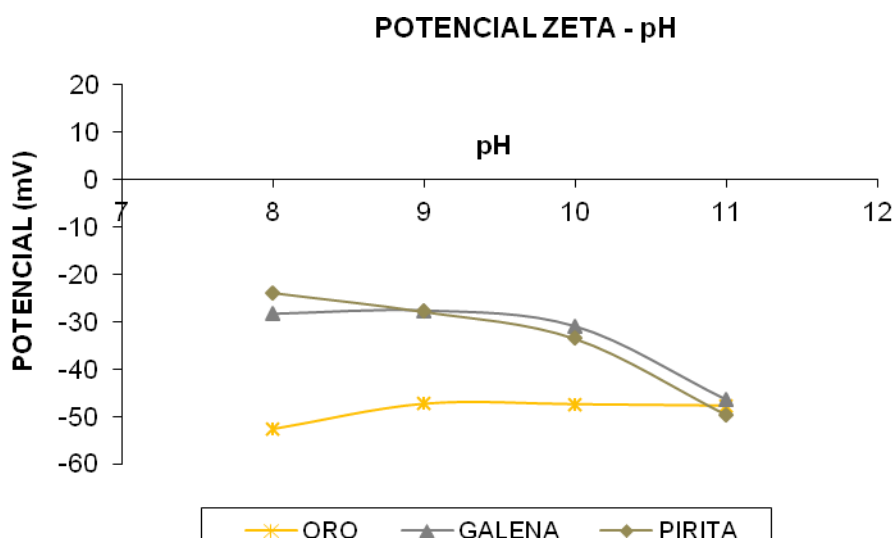


Figura 15-4 Lecturas de Potencial Z para Oro, pirita y Galena a pH basicos

De la misma forma que se ve en las mediciones de Potencial Zeta para la partícula de oro a pH Ácidos, en la figura No. 2 se observa una región de potencial zeta (entre -25 y -50 mV), en la que podemos decir que la partícula de oro, pirita y galena son inestables y son susceptibles de ser colectadas por un

tensoactivo en el proceso de flotación, cuando este se lleva a cabo a pH entre 8 y 11.

A pH 11, el potencial zeta para el oro, pirita y galena, esta cerca de -50 mV, lo que significa que a un pH de 11, no habrá separación de Oro de sus minerales acompañantes. Este resultado nos confirma que debemos usar activadores y/o depresantes.

- **Medición de energía superficial de partículas de oro nativo**

Para la medición de la energía libre superficial se hicieron mediciones de Microscopia de Fuerza Atómica (AFM), a una partícula de oro sin colector y una partícula de oro con colector. Se uso el Microscopio de fuerza atómica ubicado en el laboratorio de física del plasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Con las mediciones en el AFM, se busca corroborar los resultados obtenidos en las pruebas de flotación, en el sentido de establecer si realmente los tensoactivos están disminuyendo la tensión superficial en la superficie de la partícula oro. Los resultados obtenidos de las primeras mediciones se ven en las Figuras 16 y 17 respectivamente.

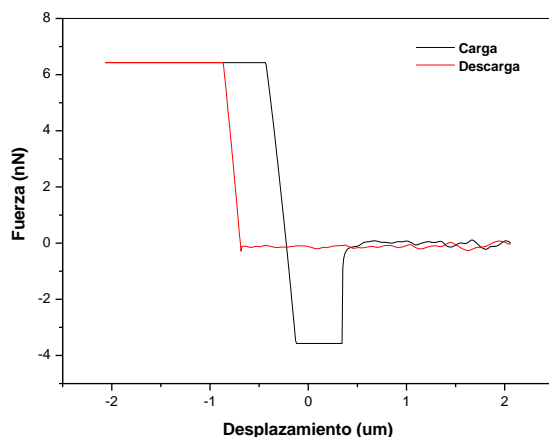


Figura 16-4. Partícula de oro sin colector

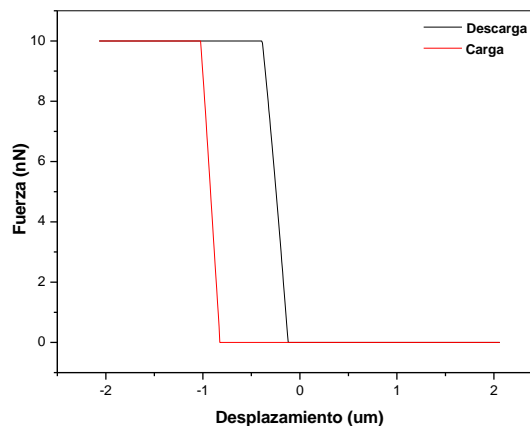


Figura 17-4 Partícula de oro con colector

Aunque los resultados no son cuantitativos, se puede determinar la energía libre superficial con los resultados de la MFA. Comparando ambas graficas, se puede determinar que la energía de la superficie en presencia del colector disminuyó

substancialmente, lo cual indica un proceso de adsorción del tensoactivo en la interface oro-agua.

Con las mediciones en el AFM No se determina cuantitativamente cual colector induce mayor hidrofobicidad a la superficie de oro, pero si se puede determinar el efecto de diferentes colectores sobre la energía libre superficial.

4.3 equipos usados en la caracterización

La caracterización química y física de los minerales se efectuó usando los siguientes equipos:

- Angulo de contacto: la medida del ángulo de contacto se realizó en un equipo OCA 15 PLUS (ver figura 18)
- Cambios de la energía libre superficial: se analizaron usando Microscopio de Fuerza Atómica (MFA)(figura 20)
- Mediciones de potencial Z: se efectuaron en Zeta Sizer Nano ZS90 Malvern (ver figura 19)
- Análisis químico elemental: se efectuaron en Espectrofotómetro de Absorción atómica, Marca Thermo-Element, modelo iCE 3300



Figura 18-4 Medidor de ángulo de contacto OCA 15 PLUS



Figura 19-4. Zetámetro Zeta Sizer Nano ZS90 Malvern (Equipo instalado en el IM CIMEX)

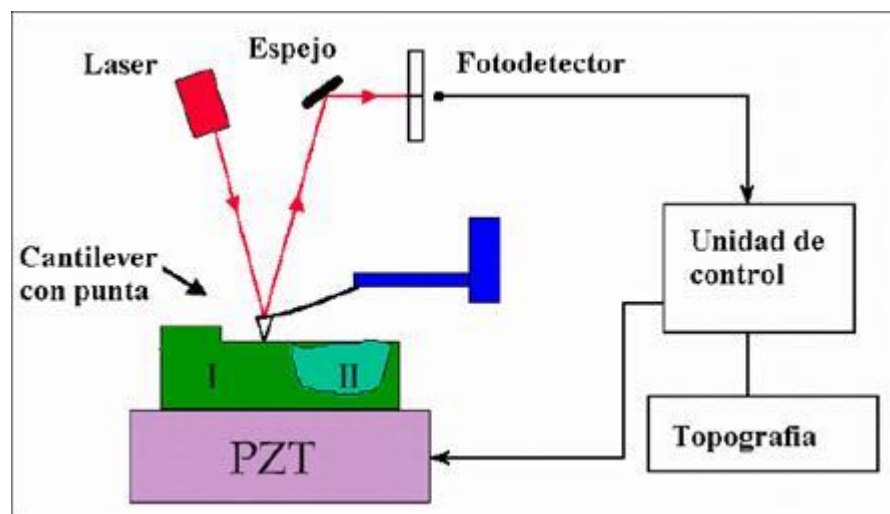
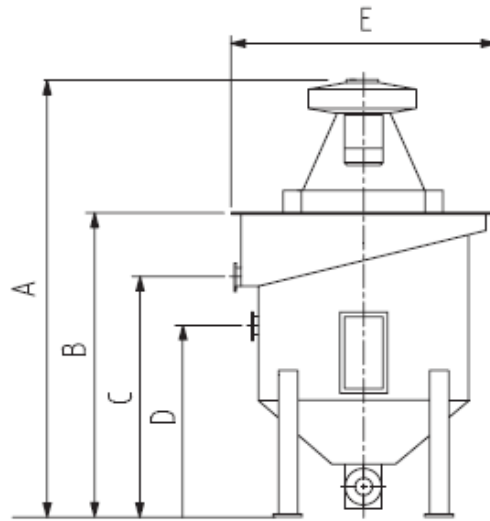


Figura 20-4. Representación Esquemática del funcionamiento del AFM.

4.4 Descripción de la celda de flotación flash y diseño.

Para realizar las pruebas de flotación en el laboratorio, se requirió fabricar un prototipo de celda de flotación flash. Para llegar al diseño de nuestro prototipo, tuvimos en cuenta algunas variables ya establecidas por Outokumpu, quienes

desarrollaron una celda de flotación llamada “skim-air flotation” (Outokumpu, 2004)



	Tank volume [m ³]	A	B	C	D	E	Weight [kg]
SkimAir [®] -2400	120	9600	7200	4900	3800	6600	30600
SkimAir [®] -1200	49	8400	5700	4000	2800	4960	23000
SkimAir [®] -500	23	6270	5000	3650		4040	8900
SkimAir [®] -240	8	4520	3120	2280		2760	3800
SkimAir [®] -80	2,2	3390	2400	1740		1900	1800
SkimAir [®] -40	1,3	2920	2175	1575		1640	1260
SkimAir [®] -15	0,3	1970	1315	800		1290	350

Figura 21-4. Variables estandarizadas para la celda de flotación skim- (Tomado de Outokumpu, 2004)

Basados en los parámetros ya establecidos y sabiendo que se requiere una condición especial en la geometría interna de la celda, se diseñó un cono interno dentro del tanque, de tal forma que a medida que la partícula ascienda, el área se disminuye y por lo tanto favorece la velocidad de ascenso de las partículas más pesadas hacia la espuma mineralizada. (Principio de Bernoulli). El volumen real de la celda es de 20 litros y su diseño se muestra en las figuras 22 y 23.

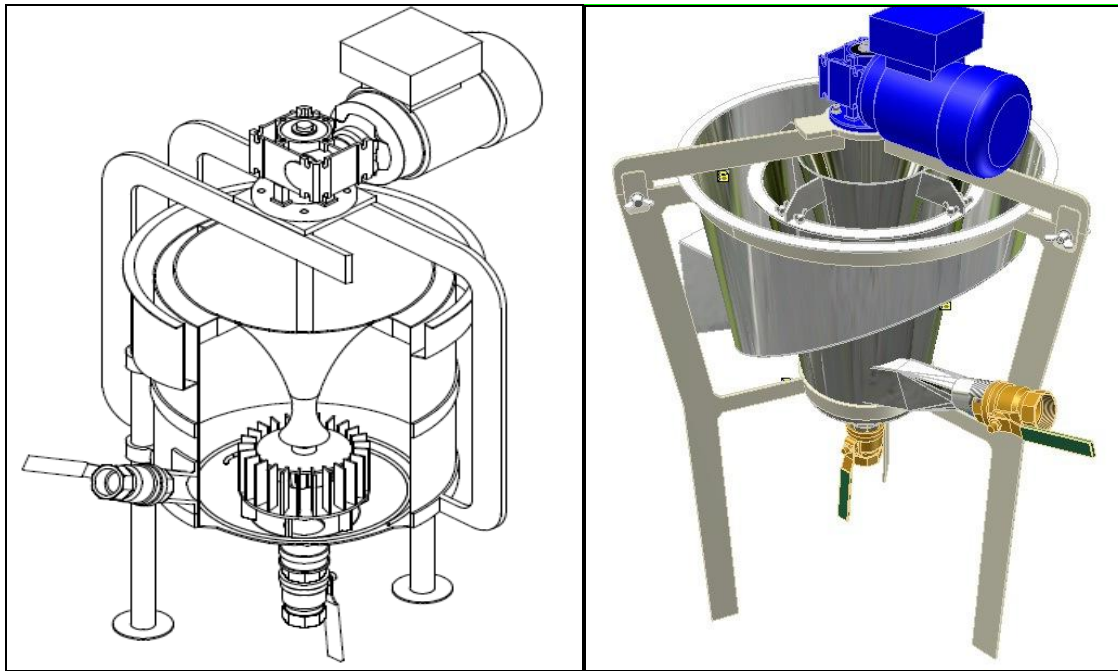


Figura 22-4. Diseño preliminar prototipo celda de flotación flash.



Figura 23-4. Celda de flotación flash, instalada en el IM. CIMEX

4.5 Descripción de los reactivos usados.

Se seleccionaron reactivos del tipo tiocolectores que favorezcan la quimisorción sobre enlaces tipo metálico, usados frecuentemente en la flotación de sulfuros metálicos.

En la Tabla 7, se presentan las características generales de los colectores utilizados para la flotación de oro libre. Estos colectores fueron utilizados, tanto para la cuantificación de la hidrofobicidad de oro mediante la medición del ángulo de contacto, como para la realización de las pruebas de flotación preliminares en tubo Hallimond y en celda Denver.

Tabla 7-4. Colectores pre- seleccionados (Tomado de: Manual de productos químicos para minería, CYTEC®, 2009.)

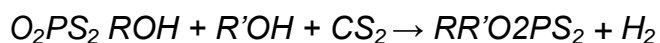
ESTRUCTURA QUIMICA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \text{R}' \quad \text{NH} \quad \text{C} \quad \text{S}^- \end{array}$	Ditiocarbamato (monoalquil y dialquil ditiocarbamatos)	Dosificaciones de 5-100gpt. Solución al 5-20% o sin diluir. Flota minerales de Pb, Zn, Cu, Fe y metales preciosos. Para la flotación de la mayoría de los sulfuros y metales preciosos en circuitos ácidos y de pH neutros.
$\begin{array}{c} \text{S H} \\ \parallel \\ \text{R O C N CH}_2 \text{ CH CH}_2 \end{array}$	Tionocarbamatos tipo alilo alquilos	Dosificación de 5-100gpt Flota sulfuros de Zn, Cu y metales preciosos. Selectividad frente a sulfuros de Fe. Disminuye la espuma si hay sobredosificación. Se combina con ditiolfosfatos de cadena corta para mejorar la flotación. Se combina con A31 para no dañar la espuma.
$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \text{R} \quad \text{O} \quad \text{P} \text{---} \text{S} \cdot \text{Na}^+ \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	Mercaptobenzotiazol y ditiolfosfato	Dosificaciones de 5-50gpt. Solución al 5-20% o sin diluir. Excelente colector para la pirita y pirita aurífera en circuitos ácidos y neutros. También funciona como colector de metales preciosos.
$\begin{array}{c} \text{H}_9\text{C}_4 \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \text{H}_9\text{C}_4 \quad \quad \text{P} \text{---} \text{S} \cdot \text{Na}^+ \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	Dialquil ditiolfosfinato	Es un exclusivo colector de sulfuro base fósforo, otorga separaciones muy selectivas, es muy efectivo frente a minerales de sulfuro de hierro, se requieren menos dosificaciones que las de xantato usadas, tiene cinética rápida y buena recolección de partículas gruesas. Excelente colector para metales preciosos.
$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \text{R} \quad \text{O} \quad \text{P} \text{---} \text{S} \cdot \text{Na}^+ \\ \quad \quad \quad \parallel \\ \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$	Dialquil ditiolfosfato isoamílico	Dosificaciones de 5-25gpt. Soluciones del 5-20% o sin diluir. Flotación de Zn, Cu y metales preciosos. Para flotar partículas gruesas.

Descripción: En general, los compuestos de fósforo usados como reactivos de flotación representan una pequeña cantidad de los compuestos orgánicos conocidos. Los compuestos orgánicos de fósforo se pueden clasificar en 2 grandes grupos: (a) compuestos en los que el fósforo está directamente enlazado con cadenas de hidrocarburos y (b) aquellos en los que se hace esta conexión con otro átomo. Los alquil y arilo ditiolfosfatos pertenecen a la segunda clase, así

como el ácido sulfúrico alquilo y el ácido Xántico pero diferente a los ácidos grasos y a las aminas en lo que respecta a la conexión de los hidrocarburos al átomo clave. Se producen ácidos dialquil Ditiófosforicos por la reacción de pentasulfuro de fósforo (P₂S₅) con un alcohol en un medio inerte. La reacción de los productos incluye el sulfuro de dialquil, ditiófosfatos dialquil y azufre. Los ácidos son inestables y se convierten en sales alcali de metales listas para ser usadas como colector. Estos ácidos diaril Ditiófosforicos difieren de los ditiófosfatos en que son estables e insolubles en agua. los ditiófosfatos tipo diaril se basan en benceno o cresol que reaccionó parcialmente con pentasulfuro de fósforo. Con cloramina los ditiófosfatos pueden producir estructuras similares a la de los Tionocarbamatos.

Los ditiófosfatos son sintetizados de alcoholes simples, o de dos tipos diferentes de alcoholes con hidróxido de sodio y disulfuro de fósforo. La longitud y estructura de las cadenas R alquil afectan la acción del colector. Hay un par de electrones solitarios en el átomo de fósforo y uno en el átomo de azufre.

El grupo funcional es:



Normalmente son estabilizados a altos pH con hidróxido de sodio para su envío a la planta concentradora.

Para efectos de simplicidad en la descripción de los reactivos, en la tabla siguiente se la referencias correspondientes a cada colector seleccionado:

Tabla 8-4. Referencias de Colectores (Tomado de: Manual de productos químicos para minería, CYTEC®, 2009.)

NOMBRE	REFERENCIA CYTEC®
Ditiocarbamato (monoalquil y dialquil ditiocarbamatos)	S-9411
Tionocarbamatos tipo alilo alquilos	AERO 5100
Dialquil ditiófosfinato	AEROPHINE 3418 ^a
Dialquil ditiófosfato	AERO 3501
Ditiocarbamato	S-8474

4.6 Montaje experimental

4.6.1. Pruebas de microflotación en celda Hallimond:

Las pruebas de flotación en la celda Hallymond, consisten en micro flotaciones, que nos permiten encontrar una tendencia en cada una de las variables analizadas para poder realizar las pruebas de flotación en celda de flotación convencional y posteriormente en la celda flash.

Procedimiento:

Las pruebas fueron realizadas en una celda Hallimond modificado de 200 cm³ con el fin de analizar la flotabilidad de una muestra constituida por un número de partículas de oro conocidas en un intervalo de pH entre 4 y 11.

A la celda Hallimond, se introduce un volumen de agua de 30ml para cada prueba, con una aireación de 2psi, y a pH alcalino.

La primera etapa consiste en el ingreso del agua y las partículas de oro a la celda. Posteriormente se regula el pH con soda cáustica y se procede a la adición del colector, el cual se deja actuar por el tiempo determinado de acondicionamiento. (10, 20 ó 30 min). Después se procede a la adición del espumante y se abre la válvula del aire para iniciar la flotación.

Las dosificaciones de reactivos fueron del orden de micro gota y algunos diluidos, debido al poco volumen alimentado a la celda tanto de oro como de solución.

El porcentaje de recuperación R que determina la eficiencia del proceso, se define como el índice metalúrgico que describe la recuperación de oro en las espumas sobre el oro alimentado total.

Los cuatro mejores procesos de recuperación son duplicados en la celda Denver

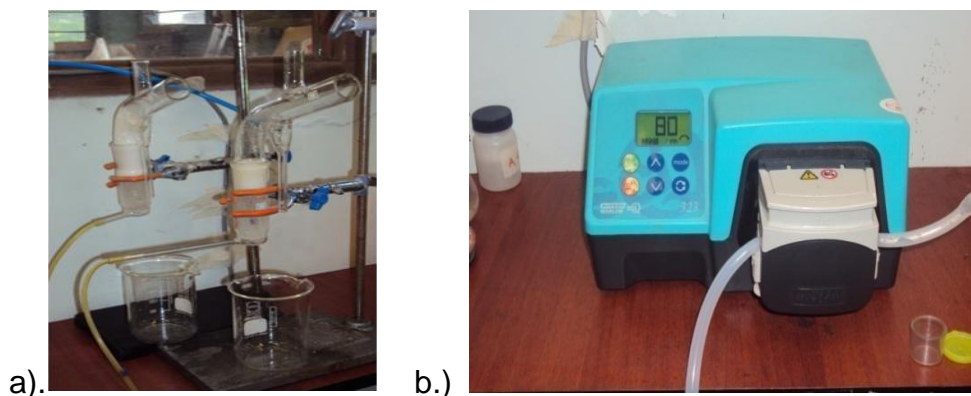


Figura 24-4. Montaje para pruebas de microflotación a).Celda Hallimond, b) Bomba peristáltica. (Instaladas en el IM CIMEX)

El suministro de aire se realiza por medio de una bomba peristáltica Watson Marlow 323. (Ver figura). El pH es medido con cinta Merck ($0.5 < \text{pH} < 13$).

Las condiciones de flotación son:

- Tiempo acondicionamiento colector: 10, 20 ó 30 minutos.
- PH de la solución: Variando entre 4 y 11
- Aire : 2 psi
- Volumen de agua: 30ml.
- Espumante: Flash 14

4.6.2. Pruebas en celda Denver convencional:

Las pruebas de flotación en celda convencional, se llevaron a cabo en una celda Denver de un litro de capacidad, instalada en el laboratorio IM. CIMEX de la Universidad Nacional. Para la realización de las pruebas se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros principales:

- volumen de la pulpa,
- % de sólidos en la pulpa,
- tiempo de acondicionamiento del reactivo,
- tiempo de flotación,
- pH de la pulpa,
- rpm de la agitación.

En la tabla 9 se detallan las variables que se tuvieron en cuenta en las pruebas de flotación en la celda Denver.

Tabla 9-4. Variables usadas en las flotaciones de la celda Denver

volumen de la pulpa	1 lit.
% de sólidos	35
pH pulpa	10.5
RPM	1200
Tiempo de acondicionamiento de reactivo	10 - 20 min.
Tiempo de flotación	5 min.

Procedimiento:

Después de la preparación de la pulpa con un 35 % de sólidos, se procede a ajustar con el pH NaOH hasta el valor previamente establecido de 10.5.

Luego se adiciona el colector y se deja acondicionar por el tiempo establecido (10 ó 20 min), agitando a 1200 rpm. Después de este tiempo se adiciona el espumante y se abre el aire, para iniciar la flotación. El tiempo de flotación es de 5 min, es decir, se recoge la espuma concentrada por 5 min.

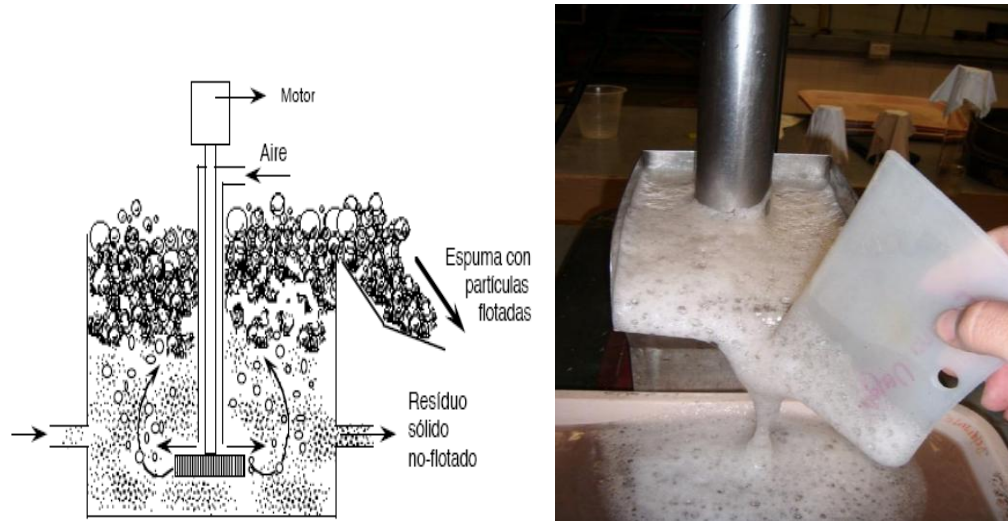


Figura 25-4. Pruebas de flotación en celda Denver

4.6.3. Pruebas en celda flash

Para la realización de las pruebas en la celda de flotación flash, se instaló el prototipo diseñado y fabricado a escala piloto, el cual se encuentra en las instalaciones del Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional.

Las pruebas en la celda de flotación flash, se realizaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de flotación en celdas Hallimond y Convencional. Se desarrolló un pequeño diseño experimental teniendo en cuenta el tipo de reactivo, el tiempo de acondicionamiento y el tiempo de flotación como factores principales.

Tabla 10-4. Diseño de experimentos para las pruebas de flotación en celda flash.

DISEÑO FACTORIAL GENERAL	
FACTORES	NIVELES
TIPO DE REACTIVO	<ul style="list-style-type: none"> • 8474 • 5100 • Z6 • 3501
TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • 10 MINUTOS • 20 MINUTOS
TIEMPO DE FLOTACION	<ul style="list-style-type: none"> • 5 MIN • 2 MIN

Procedimiento:

El volumen de pulpa usado en la celda fue de 16 lit. y se trabajo con un % de sólidos de 35%, para lo cual se uso en cada prueba 7.32 kilos de mineral seco.

El proceso se inicia con la alimentación de la pulpa ya preparada a la celda y el acondicionamiento de la misma a un pH de 10.5. Esto se logra con NaOH. En este instante se inicia la agitación a 1500 rpm y se mantiene constante durante todo el tiempo de flotación.

Seguidamente se realiza la alimentación del colector, usando 50gr/ ton de mineral seco y se deja acondicionar por el tiempo respectivo (10 ó 20 min.); después de este tiempo se adiciona el espumante y se deja acondicionar por un minuto; se abre el aire y se inicia la recolección de espuma concentrada por el tiempo respectivo de flotación (2 ó 5 min.) Al término del proceso se recoge el material de las dos corrientes (concentrado y colas de flotación flash) para iniciar los análisis de recuperación respectivos.



Figura 26-4. Pruebas de flotación en celda Flash-

Con el fin de verificar la recuperación real de oro libre en las corrientes de concentrado y colas de la flotación flash, se realizó un método en el cual se pasó cada corriente por un concentrador gravimétrico K-Nelson y luego se sometió a bateo, lo cual se ilustra en la figura 9. El mineral concentrado por bateo se seco y posteriormente se separó de forma manual, cada partícula de oro libre. El oro libre obtenido de cada corriente se pesó para así tener el peso de oro libre en cada corriente de la flotación flash.

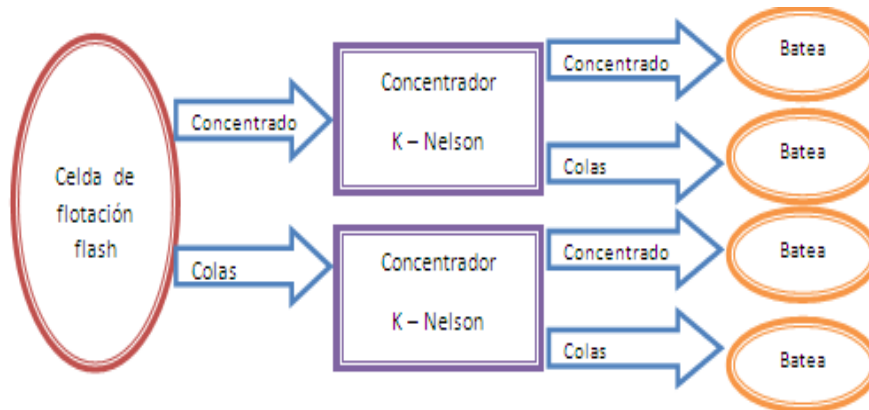


Figura 27-4. Tratamiento de las colas y el concentrado obtenidos en el proceso de flotación flash.

5. RESULTADOS

En este capítulo se muestran e interpretan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental, tanto los referidos a la caracterización de las muestras como los resultados de las diferentes pruebas de flotación.

5.1 pruebas de micro flotación en celda Hallimond

Los resultados de estas pruebas nos permiten establecer el comportamiento en flotación selectiva de oro, de los diferentes colectores preseleccionados según lo establecido en la literatura.

Entre las condiciones de flotación tuvimos una combinación de colectores Tionocarbamato y ditiofosfatos, y un espumante tipo glicoles.

Tabla 11-5. Resultados Pruebas de microflotacion con diferentes reactivos

Colector	Espumante	pH pulpa	%R
Monoalquil Ditionocarbamato (8474)	mezcla de poliglicoles	9	88,80%
Ditiofosfinato (AEROPHINE 3418 A)	mezcla de poliglicoles	9	75%
Dialquil Ditiofosfato isoamilico (Aero 3501)	mezcla de poliglicoles	11.5	100%
Ditionocarbamato (S-9411)	mezcla de poliglicoles	9,5	88,80%
Dialquil Ditiofosfato isoamilico (Aero 3501)	mezcla de poliglicoles	10	90%
Tionocarbamatos tipo alilo alkilos (5100)	mezcla de poliglicoles	10	75%
Dialquil Ditiofosfato isoamilico (Aero 3501)	mezcla de poliglicoles	9	80%
Dialquil Ditiofosfato isoamilico + xantato Amílico (3501 + PAX)	mezcla de poliglicoles	10	70%
Ditionocarbamato tipo alilo alkilos + Ditionocarbamato (5100 + 9411)	mezcla de poliglicoles	10	70%

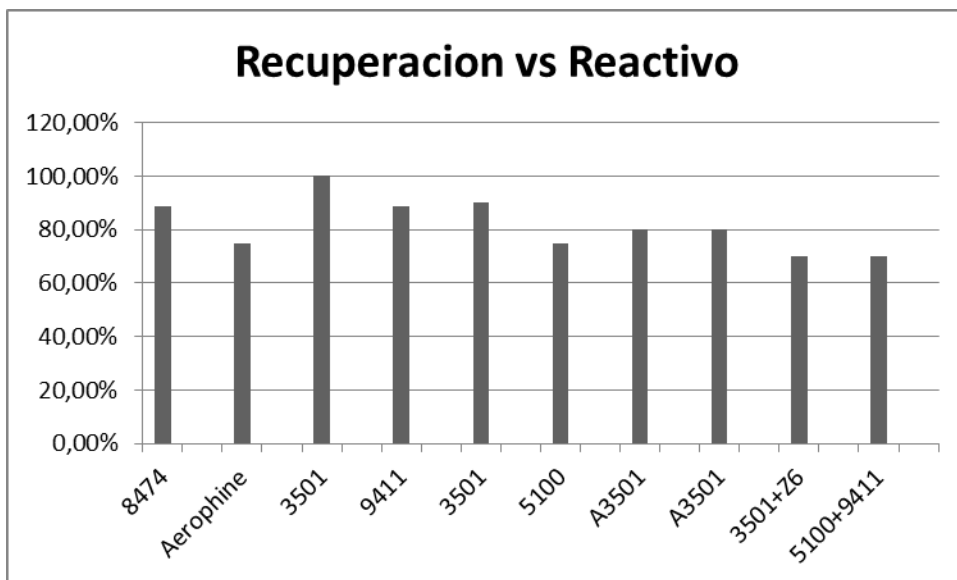


Figura. 28-5. Recuperación de oro nativo con diferentes colectores. En celda Hallimond

Con el fin de verificar el comportamiento de los colectores que mejor resultado mostraron (3501 y 8474) en las pruebas preliminares de microflotación, se realizó nuevamente con estos colectores pruebas a tres diferentes valores de Ph.

Los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12-5. Recuperación de Oro a diferentes pH.

COLECTOR	DOSIFICACION	pH	Recuperacion % R
3501	0.0699 gr	6	100
		7	88
		9	100
8474	0.01059 gr	6	71
		7	88
		9	100

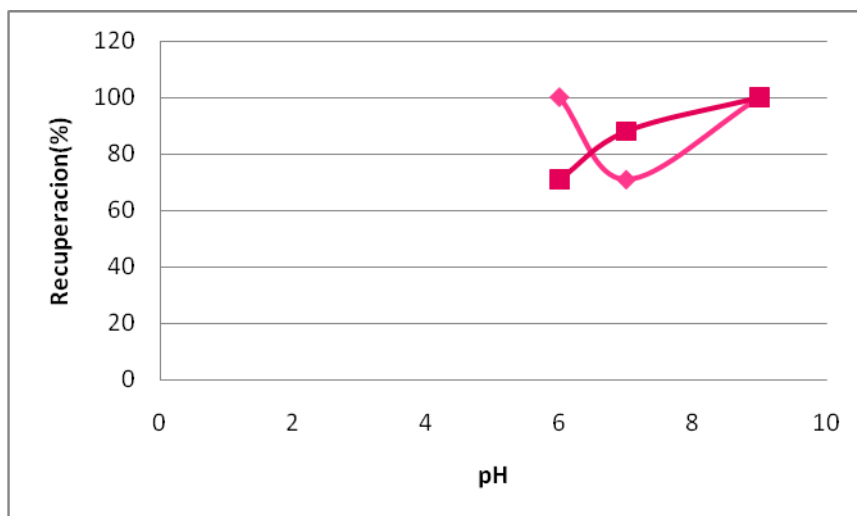


Figura. 29-5 Recuperación de oro a diferentes pH.

De acuerdo a la figura 29, a un pH de 9, para los dos colectores probados, se tienen recuperaciones de 100%, para las pruebas con los granos de oro libre en la celda Hallimond.

De los resultados mostrados en la tabla 12, y sabiendo que se debe favorecer la flotación de los granos de oro libres y la precipitación de sulfuros, se determina un valor de pH de 10.5, con el fin de favorecer la precipitación de la pirita en las pruebas a realizar en las celda de Denver y Flash.

5.2 Pruebas de flotación en celdas Denver

El objetivo de esta prueba es verificar los resultados obtenidos en el tubo Hallimond con las cuatro mejores pruebas, pero ahora teniendo en cuenta que las partículas de oro se encuentran inmersas en una pulpa con un 35% de sólidos. Nuevamente las pruebas con las condiciones que permitieron obtener los mejores resultados en términos de la recuperación de oro en la celda Denver son verificadas en la celda de flotación flash.

Se hizo pruebas en la celda Denver, variando tiempo de acondicionamiento y colector usado. Se analizó el comportamiento de cuatro colectores estudiados previamente en mediciones de ángulo de contacto y MFA y los cuales mostraron mejores resultados en las pruebas en celda Hallimond

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13-5. Mejores resultados de flotación en celda Denver

REACTIVO	DSIFICACION (gr/ ton)	ACONDICIONAMIENTO	PH	ESPUMANTE	DOSIS DE ESPUMANTE	TIEMPO DE FLOTACION	RECUPERACION %
3501	0.0699	10 min.	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	73
3501	0.0699	20 min	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	74
8474	0.0699	10 min.	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	75
8474	0.0699	20 min	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	72
9311	0.0699	10 min.	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	54
9311	0.0699	20 min	10.5	Poliglicoles	1 microgota	5 min.	64

De nuevo se evidencia que los mejores resultados en la recuperación de oro libre, se presentan cuando usamos los colectores 3501 y 8474; sin embargo de alguna manera se obtuvo un resultado por debajo de lo obtenido en las pruebas en la celda Hallimond.

Como el objetivo es hacer pruebas en celda de flotación Flash, (tiempos de flotaciones más cortos), se decide tener en cuenta una tercera variable para las pruebas de flotación en la celda flash que es el tiempo de flotación. Se mantendrán como variables además el tiempo de acondicionamiento del colector y el tipo de colector.

5.3 Pruebas de flotación en celda flash

Después de desarrollar la matriz experimental, según el diseño de experimentos, los mejores resultados de las pruebas en la flotación Flash, se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 14-5. Mejores resultados de pruebas en Flotación Flash.

COLECTOR	DOSIF. COLECTOR	PH	ACOND. COLECTOR	ESPUMANT.	DOSIF. ESPUMANT.	TIEMPO FLOTACION	RECUPERACION %
3501	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	63 gr/ton	5 min	84.56
8474	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	85 gr /ton	5 min	97.22
9411	50 gr/ton	10.5	20 min	A 65	85 gr /ton	5 min	82.82
8474	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	63 gr/ton	2 min	95.58
3501	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	63 gr/ton	2 min	99.28
8474	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	67 gr/ton	2 min	95.55
3501	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	67 gr/ton	2 min	94.92
3501	50 gr/ton	10.5	10 min	A 65	67 gr/ton	2 min	79.1
3501	50 gr/ton	11	10 min	A 65	67 gr/ton	2 min	52.2
3501	45 gr/ton	11	10 min	A 65	50 gr/ton	1 min	98.21

Desarrollando el proceso descrito anteriormente para la verificación de la recuperación del oro libre, se analizaron las pruebas con mejores resultados y se verifica que las pruebas realizadas con los colectores 3501 y 8474, un tiempo de acondicionamiento de 10 min y tiempos de flotación más cortos (2 min), tuvieron las mejores recuperaciones de partículas de oro libre. Se evidencio que las mejores recuperaciones se dieron además con tiempos de flotaciones más cortos, validando el propósito de la flotación flash de hacer flotaciones rápidas.

5.4 Medición de ángulo de contacto para las partículas de oro con adición de colector.

Previas a las pruebas de flotación, se realizaron mediciones del ángulo de contacto para las partículas de oro con diferentes colectores y a diferentes tiempos de acondicionamiento.

Estas se realizaron en el Laboratorio de Ginuma de la UPB, el cual posee un Equipo OCA SISTEM, el cual se basa en el método de la gota en reposo.

Los resultados de estas mediciones, nos permitieron identificar el reactivo que induce mayor hidrofobicidad a las partículas de oro y el mejor tiempo de acondicionamiento para el reactivo. Además con estos resultados, se logro identificar las variables a tener en cuenta en el diseño de experimentos para las pruebas en la flotación flash, descritas arriba.

La siguiente figura nos muestra los resultados obtenidos en las mediciones de ángulo de contacto para la partícula de oro con diferentes colectores y diferentes tiempos de acondicionamiento.

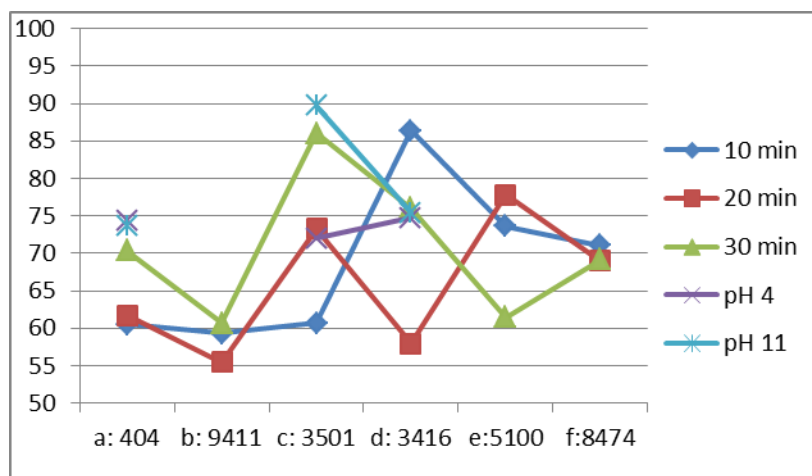


Figura 30-5. Valores del ángulo de contacto para la partícula de oro con diferentes colectores y a diferentes tiempos de acondicionamiento.

En las siguientes figuras, se observa una foto de la gota, para el reactivo con mejor comportamiento en las mediciones de ángulo de contacto.

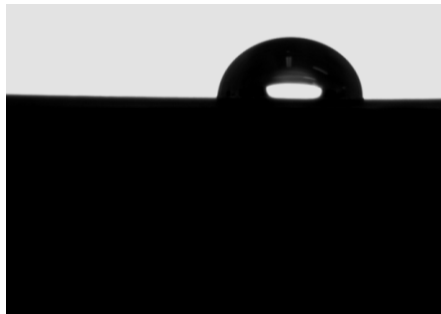
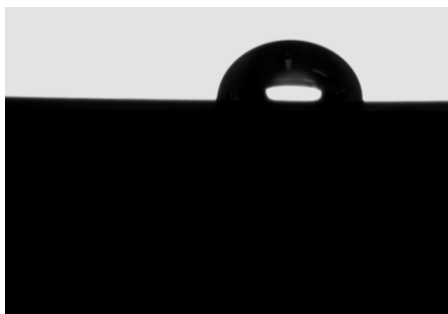


Fig. 31-5 a) Colector 3501 a 30 min y pH 11

Fig. 31-5 b) Colector 3501 a 30 min y pH 11

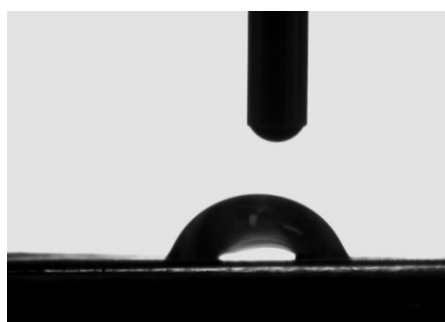


Fig. 31-5 c) Colector 3501-10 min

Fig. 31-5 d) Colector 3501 - 20 min

Los resultados de las mediciones de ángulo de contacto, muestran que el reactivo 3501, nuevamente presenta un mejor comportamiento. El mayor valor obtenido para el ángulo de contacto, nos indica que es el colector que le induce mayor hidrofobicidad selectiva a la superficie de oro cuando tenemos un mayor tiempo de acondicionamiento y a un pH de 11. Pero no solo el reactivo 3501 presenta buenos resultados, también encontramos que el reactivo 3416 proporciona hidrofobicidad selectiva a la superficie de oro con un tiempo de acondicionamiento de 10 minutos y a pH natural.

Pruebas en Configuración Flash-Columna.

Se ejecutaron ensayos en configuración celda Flash y la descarga de esta (colas), se paso a limpieza en celda de flotación en columna, como se muestra en la figura 32

Esta configuración obedece a la alternativa en la cual el oro libre se puede encontrar en dos fracciones granulométricas de tamaño: oro grueso (mayor a 100 micras), y un oro fino que por las condiciones de la celda flash, son difíciles de recuperar en este dispositivo.

En la Tabla 15 se muestran los resultados que se obtuvieron en esta prueba.

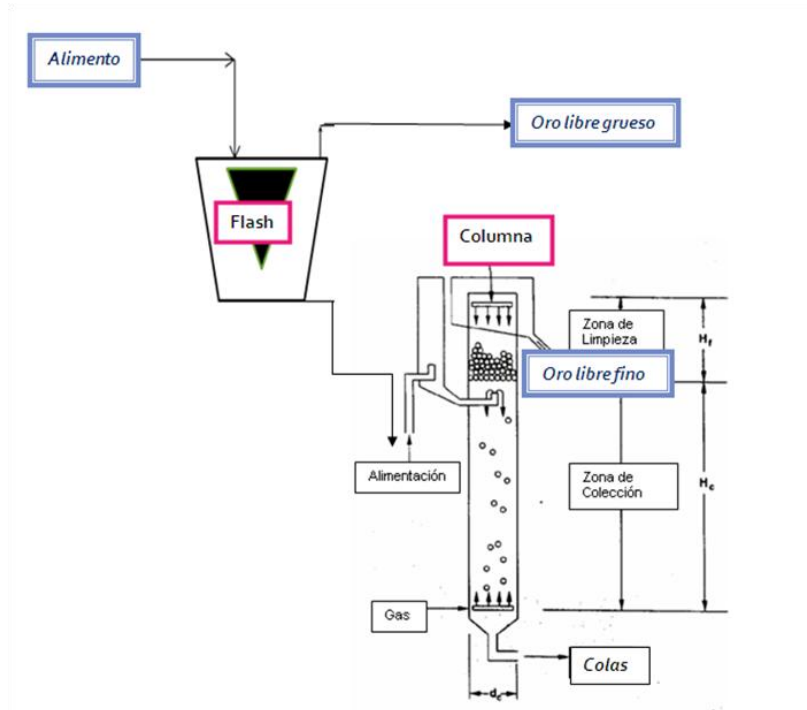


Figura 32-5 Configuración Celda Flash – Columna.

De los resultados de la tabla 15, se aprecia que del 100 % del oro libre, 55.9% se recupera en la celda de flotación Flash, mientras que un 44.1% se recupera en la celda en Columna. Esta configuración valida el criterio de este proyecto en el cual en la celda flash, se recupera solamente el oro grueso libre.

El oro libre y fino es difícil recuperar en este dispositivo y para ello se usan otras tecnologías alternas como la flotación en columna.

Tabla 15-5. Resultados prueba en configuración celda flash y columna.

Flotación	Pulpa	Sólidos	Colector	Dosificación	% de oro libre recuperado	
					flash	Columna
	pH	% en peso	Espumante	[g/ton]		
Flash	9	15	DDPI	90	55,90	44,10
			Poliglicoles	132		
Columna	9		DDPI	60		
			Poliglicoles	88		

6. DISCUSIÓN

6.1 Flotabilidad natural del oro nativo

Las mediciones de ángulo de contacto de las superficies de oro nativo sin adición de colectores, permiten deducir un comportamiento hidrofílico de las superficies de oro nativo, lo cual indica que la flotabilidad natural discutida por algunos autores ((Marsden and House, 1992, Allan and Woodcock, 2001), solo se daría por la presencia de algunas patinas; lo cual admite una gran paradoja fisicoquímica, pues el oro como metal noble posee una fuerte estabilidad química pero su superficie presenta potenciales zeta fuertemente negativos que admiten la interacción con los grupos ácido y será la protonización de estas superficies la que genera el carácter fuertemente hidrofílico.

De lo anterior es posible deducir la relativa facilidad de la hidrofobización selectiva del oro en los intervalos de pH básico, dado que la interacción con el grupo iónico del agua OH^- es relativamente más baja que con el grupo iónico H^+ y por lo tanto la competitividad de los tio colectores, es favorecida y por ende la quimisorción de ellos para la formación del complejo AuX en la interfase solución acuosa-partícula aurífera.

Por otro lado, se puede asumir que el mecanismo de hidrofobización de las partículas de oro básicamente está compuesto de dos eventos:

Un primer evento que consiste en la formación de una monocapa de tio colectores quimiadsorbidos como lo plantea Beattie *et al*, 2010 y un segundo evento que es la coadsorción del colector para formar el dímero, que según la tabla No.3 (Castro y García, 2003), el potencial de precipitación del tio colector usado en esta investigación ocurre a 0.255 vol.

Esta investigación usó la técnica de AFM para validar la substancial disminución de la energía libre superficial de la superficie de oro nativo, encontrando un excelente ajuste de este efecto con la hidrofobización selectiva y la flotabilidad del oro nativo.

6.2 Aspectos operacionales

La celda flash puede ser usada en la descarga de molino primario en pequeña Minería y/o en la descarga de clasificadores en el retorno, cuando se cierran los circuitos de molienda clasificación. (Figura 33)

Este proceso compite con el uso actual del mercurio y concentraciones gravimétricas tipo jig y centrífugas que suelen usarse actualmente. Por las

características de la corriente en las que es instalada una celda Flash, el oro flotado es grueso (mayores a 150 micras).

Esta técnica en la actualidad se usa para la concentración rápida de minerales que hayan alcanzado su liberación en las descargas de los clasificadores, incrementando la recuperación global de las planta y cuyo objetivo principal es evitar la sobre molienda de minerales liberados y que retornan en las corriente de recirculación la molino.

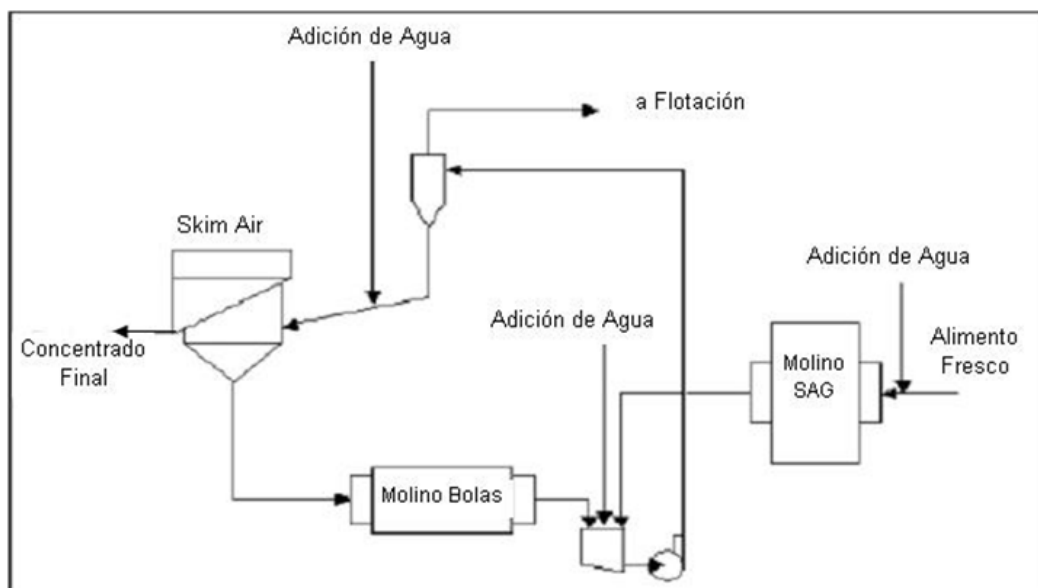


Figura: 33-6. Esquema flotación flash, en circuito de Molienda. (Tomado de outo kumpu, 2004)

Los principales beneficios con el uso de Celdas de Flotación FLASH, son:

- Menor remolienda de valores
- Incremento de la recuperación típica
- Mejor humedad de concentrados”
- Concentrados Finales de alta ley, son recuperados sólo en una sola etapa
- Volúmenes Menores en las Celda convencionales.

En la figura 34 se muestra la celda de flotación flash, diseñada en este proyecto.

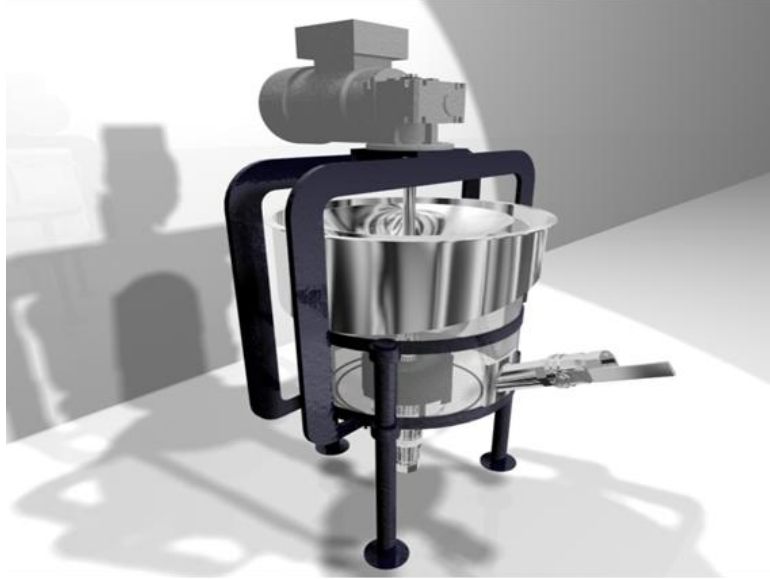


Figura 34-6 Celda de flotación Flash

La flotación flash es un proceso que esta siendo incluido en muchas plantas de procesamiento de mineral como parte del circuito de molienda, algunas de estas plantas son:

- En Minera Atacocha en Perú esta siendo usada para la flotación flash de plomo
- La mina peruana de Consorcio Minera Horizonte también ha puesto en marcha un circuito de flotación flash después de los jig. Actualmente esta recuperando un promedio de 70% con la celda de flotación flash, es decir un 30% de oro por encima de los 30 a 40% de recuperación de oro grueso recuperado por los jig.
- Minera esperanza en Calama Chile, instalo 4 celdas de flotación flash para la recuperación de oro desde el año 2010.

6.3 Impacto ambiental del proyecto

El uso del mercurio en la minería colombiana ha generado serios impactos ambientales y tecnológicos que históricamente hacen que existe una asociación maligna entre la minería aurífera y la contaminación de suelos, aguas superficiales y demás actores en los ambientes alrededor de las minas.

La contaminación con mercurio en las regiones mineras auríferas de Antioquia, ha sido corroborada por diferentes investigadores (Veiga, 2010, ONUDI, 2007). Existe

una buena correlación entre la minería artesanal y el incremento de las pérdidas de mercurio en los procesos de enriquecimiento de minerales auríferos, pues mientras la gran minería reporta pérdidas de 0.001 gr de mercurio/gr de oro producido, la pequeña minería reporta pérdidas de hasta 14.5 gr de mercurio/ gr de oro producido en promedio y el cual puede ascender hasta 66.5 gr de mercurio/ gr de oro producido. (Veiga, 2010), con valores mínimos de 7.5 gr de mercurio/ gr de oro producido (Veiga, 2010), lo que implicaría unas pérdidas globales de Mercurio alrededor de 55.1 ton/año solo en 5 municipios del Nordeste Antioqueño: (Segovia, Remedios, Nechí, El Bagra, Zaragoza).

Se estima (Veiga, 2010) que del 100% de las pérdidas el 34% se emite a la atmósfera y el 66% va a parar a las corrientes de agua o quebradas.

La tecnología que tradicionalmente usan los mineros en estas regiones consiste en el uso de cocos amalgamadores, en los cuales se estima que alrededor de un 50% del mercurio se pierde en el proceso.

Este proyecto está fundamentalmente dirigido a eliminación de un problema histórico el cual es el uso de mercurio en la minería aurífera. En este motivo favorece el medio ambiente y se proyecta como una propuesta que mejora las relaciones minería-medio ambiente y procura por la sostenibilidad de la explotación de oro.

7. CONCLUSIONES

1. Las sustancias surfactantes adheridas a la superficie de la partícula, modifican el *ZPC*, condición que puede favorecer la adherencia ó no adherencia de las partículas a las burbujas de aire para garantizar una flotación espumante selectiva.
2. De acuerdo con los datos experimentales presentados en la Tabla 6 el valor promedio del ángulo de contacto medido sobre una superficie de oro de ley 999, sin aplicar colector es de 43.70° .
3. El ángulo de contacto para el oro puede ser modificado favorablemente, mediante la adición de diferentes colectores y mezclas de colectores, como es el caso para las mezclas con dialquil ditiofosfato isoamilico (3501), que alcanzó valores hasta de 96.
4. De acuerdo con las pruebas de flotación en el tubo Hallimond, se observa que en general para los diferentes tamaños de partículas, el porcentaje de recuperación se ve favorecido por los valores de pH básicos.
5. Se logra la flotabilidad de oro nativo relativamente grueso en una celda flash diseñada por esta investigación y que puede ser una alternativa para la eliminación directa del mercurio.
6. El reactivo usado permite obtener hidrofobicidad selectiva de oro en menas auríferas acompañadas de sulfuros, tales como: piritas, calcopiritas, galena y esfalerita, dado que en ningún momento el oro nativo presenta hidrofobicidad natural.
7. El tamaño de grano de las partículas de oro obtenidas en la flotación usando celda flash es relativamente grueso, mayor a malla 100 (Tyler, aproximadamente 150 micrones)
8. El tiempo de residencia en la flotación flash como su nombre lo indica se sugiere ser corto del orden de hasta 2 min de flotación en la celda flash. Tiempos mayores a este comprometen la selectividad de la flotación y generan una disminución del tenor de oro en los concentrados que salen en la espuma de flotación.
9. Se diseño y fabricó un prototipo de la celda Flash, considerando parámetros hidrodinámicos para evitar la sedimentación de la partículas de oro demasiado gruesas, pues la tendencia de este tipo de partículas (oro grueso) es de sedimentarse rápidamente y evitar ser colectados en espumas mineralizadas.

8. BIBLIOGRAFIA

AKSOY, B.S. YARAR, B. Natural hydrophobicity of native gold flakes and their flotation under different conditions. Processing of complex ores, ed. G.S. Dobby and S.R. Rao, (Proc. International symposium on Processing of complex ores, Halifax, 1989) Pergamon Press, New York, pág. 19-27. 1989.

A.J. TEAGUE, J.S.J. VAN DEVENTER AND C. SWAMINATHAN., A Conceptual Model for Gold Flotation; minerals engineering. Vol. 12 No. 9 pp 1001-1019. 1999.

ALLAN, G.C. WOODCOCK, J.T. A review of the flotation of native gold and electrum. Minerals Engineering, Vol. 14, No. 9. 2000.

BEATTIE et AL. Synchrotron XPS studies of collector adsorption and co-adsorption on gold and gold: silver alloy surfaces. Mineral processing Vol 92 pp 162-168, 2010.

BOTELHO DE SOUSA, A. M. R., O'CONNOR, C. T., y DUNNE R. C. "The Influence of Various Chemical, Physical and Mineralogical Factors on the Flotation of Gold Bearing Pyrites". *Gold 100*. Proceedings of the International Conference on Gold. Volume 2: *Extractive Metallurgy of Gold*. Johannesburg, SAIMM, 1986.

BOURKE, P "Recent Development in Outokumpu Flotation Technology, 1998

BULATOVIC, S.M., Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides. Mineral Engineering, Vol 10, No. 9. Pág 895-908. 1997.

BURKE, L.D., NUGENT, P.F. The electrochemistry of gold: I The redox behaviour of the metal in aqueous media. Chemistry Department, University College Cork. Gold Bulletin 30 (2) Ireland. 1997.

BUSTAMANTE R. M.O., GAVIRIA C. A.C., RESTREPO B.O.J. Notas de la asignatura Concentración de Minerales. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. 111 pág. 2008.

CASTRO, SERGIO Y GARCÍA, JUAN A. Flotación, Fundamentos y Aplicaciones. DIMET, Universidad de Concepción, 2003.

CASTRO, S.J. Innovación en la recuperación de oro fino y ultrafino mediante el uso de flotación en columna en el distrito aurífero de Marmato. Universidad Nacional de Colombia. 2003.

KUJAWA CHRISTIAN, PERTER BOURKE AND PATRICIO RODRIGUEZ. Gold Recovery Improvement With outokumpu Flash Flotation. Procemin, Chile 2006.

CHRYSSOULIS S, L., VENTER, D., DIMOV S. On the floatability of gold grains. 35th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors. Pag 455-472. Canada, 2003.

CHRYSSOULIS S, L., DIMOV S.S. Optimized conditions for selective gold flotation by ToF-SIMS and ToF-LIMS. Surface science 231-232, 265-268 2004.

DE KOK, S. K. "Gold Concentration by Flotation". *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 76, 139-141, 1975.

CYTEC. Manual de productos químicos para minería. Pág 1-347. 2008

FUERSTENAU M.C., Jamenson G.J., Yoon R.H., Froth Flotation: A century of Innovation . Society for Mining Metallurgy and Exploration. 2007

FUERSTENAU M.C., HAN K.N. Principles of mineral processing. Society for mining metallurgy and exploration, Inc. Pag 260-306, 2003.

FUERSTENAU, D. W., The Froth Flotation Century, in *Advances in Flotation Technology*, B. K., Parekh and J. D. Miller, ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, CO, pp. 3-21. 1999.

FUERSTENAU, D. W., y MISHRA, R. K. "On the mechanism of pyrite flotation with xanthate collectors". In *Complex Sulphide Ores*, ed. M. J. Jones. I.M.M., London, pp. 271- 277, 1980.

FUERSTENAU, M. C. "Sulphide Mineral Flotation". In *Principles of Flotation*, ed. R. P. King, South African Institute of Mining and Metallurgy Monograph Series No. 3, Johannesburg, 1982.

GAUDIN, A.M. *Flotation*. Mc Graw Hill Company Inc. 2nd. Ed. New York, 573 pp., 1957.

Green D. "flash roughing in an Outokumpu Skim air flotation cell; news developments create new opportunities" Proceedings Randol Gold & Silver Forum '99 Denver, Colorado, USA May 11-14, 1999

K. FORREST, D. Y Otros. "Optimization of gold recovery by selective Gold flotation for copper-gold-pyrite ores". *Minerals Engineering*, Vol 14, No.2 pp 227-241, 2001.

Kelly E.G., Spottiswood D.J. Introducción al procesamiento de minerales. México. Pág 331 – 352, 1990.

King, R.P. Principles of flotation. South African Institute of Mining metallurgy. Pág 16-52, 1982.

KLIMPEL, R. R. "Industrial experiences in the evaluation of various flotation reagent schemes for the recovery of gold". *Minerals and Metallurgical Processing*, vol. 16, No. 1, Feb. 1999, pp 1-11.

KLIMPEL, R. R., DHANSEN, R., FEE, B.S. "Selection of Flotation Reagents for Improved Sulphide Mineral Flotation". In *Design and Installation of Concentrating and Dewatering Circuits*. Mular, A.L. Anderson, M.A. eds., pp. 384-404. 1986.

KUJAWA, CHRISTIAN, BOURKE, PETER y RODRIGUEZ PATRICIO. "Gold recovery improvement with Outokumpu Flash flotation".

LAPLANTE, A. R. y DUNNE, R. C. "The gravity recoverable gold test and flash flotation". *Proceedings 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, Enero 2002.

Lin, Y.-Ch., Yu, B.Y., Lin, W.Ch. Lee, S.-H., Kuo, Ch.-H., and Shyue, J.-J. (2009). Tailoring the surface potential of gold nanoparticles with self-assembled monolayers with mixed functional groups. *Journal of Colloid and Interface Science* 340, pp. 126-130.

Lotter, N.O., Bradshaw, D.J. The formulation and use of mixed collectors in sulphide flotation. *Mineral engineering* 2010.

MAKANZA A. T, VERNMAAKM.K.G, y DAVIDTZ, J.C. the flotation of Auriferous pyrite with a mixture of collectors. *Mineral processing*, vol 86,pp 85-93, 2008

MARSDEN J., HOUSE I. The chemistry of gold extraction. Editorial Ellis Horwood Limited, U.S.A. pág. 423-457, 1993.

MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of experiments* . John Wiley and Sons Inc., 700 pp., 1997.

NAGARAJ, D.R., BRINEN, J.S., FARINATO, R.S., LEE, J. A study of the interaction of Di-p-cresyl monothiophosphate with noble metals using electrochemical, wetting and spectroscopic methods. American Chemical Society. Pag 1942-1949. 1992.

OUTOKUMPU Technology. SkimAir® For Flash Flotation and Flash Roughing™. 2004.

ORTIZ B, FRANKLIN. Geología de los depósitos Minerales Metalicos. Universidad nacional Sede Medellin, pp 85, 1992.

PAVEZ, OSVALDO. Apuntes sobre concentración de Minerales. Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, 2005.

PEARSE, M.J.N., An overview of the use of chemical reagents. *Minerals Engineering* (18), pág. 139 – 149, 2005.

RAO, H.K., FORSSBERG, K.S.E. Mixed collector systems in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 51, 67-79. 1997.

S. MACKINNON, D. YAN, R. DUNNE "The Interaction of flash flotation with closed circuit grinding" AB XIV Intern. Min. Proc. Congress 1988.

STEPHEN L. CHRYSSOULIS, DANIELA VENTER, AND STAMENT DIMOV., On the Flotability of Gold grains. *Canadian Mineral Processors*, Paper 28, 35th Annual Meeting. 2003.

TEAGUE, A.J., VAN DEVENTER, J.S.J., SWAMINATHAN C. The effect of galvanic interaction on the behavior of free and refractory gold during froth flotation. *International Journal of Mining Processing*, 55, pág 243 – 263. 1999.

TEAGUE, A.J., VAN DEVENTER, J.S.J., SWAMINATHAN C. A conceptual model for gold flotation. *Minerals Engineering*, Vol2, No.9. pág 1001-1019. 1999.

TOLLEY, W., KOTLYAR, D., WAGONER, R.V., Fundamental electrochemical studies of sulfide mineral flotation. *Minerals Engineering*, Vol., 9, No. 6. Pág 603-637. 1996.

VILLEGAS, M., MANZANEDA, C. Remolienda de mixtos en la flotación bulk Pb-Cu en Atacocha. *Seminario Avances de flotación de minerales polimetálicos*, Colegio de Ingenieros del Perú. 37 pág. 2006.

WENQUIAND, WANG; POLING, GEORGE W.; Methods for recovering fine placer gold, *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*; diciembre , 1993.

ZETA-METER INC. Zeta Potencial: A complete Course in 5 Minutes, Stauton, USA, 1998.

ANEXO 1.

El siguiente es un artículo derivado de las mediciones realizadas usando MFA el cual fue presentado en el Congreso Cytec en octubre de 2010 en Antofagasta (Chile).

CARACTERIZACIÓN DE LA ENERGIA LIBRE SUPERFICIAL Y EL EFECTO SOBRE LA HIDROFOBICIDAD DE LA ADSORCIÓN DE COLECTORES SOBRE PARTICULAS DE ORO USANDO MFA

M. Oswaldo Bustamante R.¹ & Doria M. Naranjo G.².

¹ Instituto de Minerales CIMEX – Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Medellín – COLOMBIA
Email: mobustam@unal.edu.co

² Distribuidora de Químicos Industriales S. A. Medellín – COLOMBIA
Email: dnaranjoquindus@une.net.co

RESUMEN

Se presentan los resultados de medición de energía libre superficial usando Microscopio de Fuerza Atómica (MFA), y su relación con la hidrofobicidad y posterior flotación de partículas de oro.

Se evalúa la adsorción específica de colectores sobre partículas de oro y se caracterizan las superficies antes y después de la adsorción, lo cual permitió medir la diferencia de energía libre superficial y su relación con la recuperación de oro en las espumas.

Introducción

La hidrofobicidad selectiva de partículas de oro ha sido estudiada (Teague, *et al.* 1999; Allan & Woodcock, 2001, Stephen *et al.*, 2003), pero aun se tiene limitaciones de los modelos conceptuales del proceso. Lo anterior unido a las limitaciones del uso de mercurio como etapa final de limpieza de oro, debido a las restricciones ambientales, obliga a cambios de tecnología donde la flotación espumante es una de las más prometedoras.

Para inferir la adsorción e hidrofobicidad de los colectores en la superficie de minerales, clásicamente se ha usado la medición del ángulo de contacto θ , y con el uso de la ecuación de Young:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

Se establece un equilibrio entre la energía superficial del sistema y las tensiones superficiales, donde $\gamma_{SV}, \gamma_{SL}, \gamma_{LV}$ son tensiones superficiales y los subíndices S, V y L se refieren a las fases sólido, vapor y líquido, respectivamente.

De la fisicoquímica de interfaces, se tiene que la energía libre superficial y la tensión superficial tiene la relación (Castro, 1987):

$$dG = \gamma dA \quad (2)$$

Siendo G, γ y A , la energía libre superficial, la tensión superficial y el área superficial, respectivamente.

Asumiendo que la tensión superficial posee al menos dos componentes, uno relacionado a la tensión superficial de dispersión y otra componente relacionada a otras fuerzas en la interface:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^m \quad (3)$$

Se puede integrar la ecuación 2 y se obtiene que:

$$G = \gamma^d A + \gamma^m A \quad (4)$$

Por otro lado, si se considera la variación de la energía libre superficial ΔG por la adsorción de tensoactivos, debe variar el ángulo de contacto θ y a su vez la energía libre superficial en su componente de la tensión superficial diferente a la componente de dispersión de London:

$$\Delta G = \left[\gamma_{ads}^m - \gamma_{sin ads}^m \right] A \quad (5)$$

La acción de un colector estará orientada a disminuir la energía libre superficial, por lo que $\gamma_{ads}^m \rightarrow 0$, la cual es la tensión la componente de la tensión superficial de enlace cuando ha ocurrido la adsorción de tensoactivo, mientras que γ_{sanadh}^m es una propiedad material de mineral y en este caso del oro.

Por otra parte, la medición directa de la energía superficial de minerales ha sido restringida y en la actualidad se presenta el Microscopio de Fuerza Atómica (MFA) como una alternativa. Este procedimiento tiene antecedentes (Yalamanchili, *et.al.*, 1998), y esta investigación desarrolla esta alternativa para la determinación de energía libre superficial y por ende la medición directa de la adsorción de reactivos sobre superficies auríferas.

En microscopia de fuerza atómica, se rastrea la superficie con una punta que tiene una longitud del orden de micrómetros y cuyo radio de curvatura es de 100Å. La punta está acoplada a la parte final de un cantiléver cuya longitud oscila entre 100 mm y 200 micras.

Las fuerzas que se presentan entre la punta y la superficie de la muestra hacen que se refleje el cantiléver, dicha deflexión es medida por medio de un detector y con ayuda de un computador genera una imagen topográfica de la superficie.

La fuerza más común asociada a la microscopía de fuerza atómica es la fuerza de Vander Waals. En la figura anterior se observa la dependencia de la fuerza de Van der Waals con la distancia que hay entre la punta y la superficie de la muestra.

En el régimen de fuerza repulsiva la distancia entre la punta y la muestra está entre 10 Å y 100 Å, y en el régimen de fuerza atractiva, la distancia entre la punta y la muestra está entre 100 Å y 1000 Å. En el régimen de fuerza repulsiva se está trabajando con microscopia de fuerza atómica en modo contacto (AFM-C) y en la atractiva se está utilizando el modo no contacto (AFM-NC)

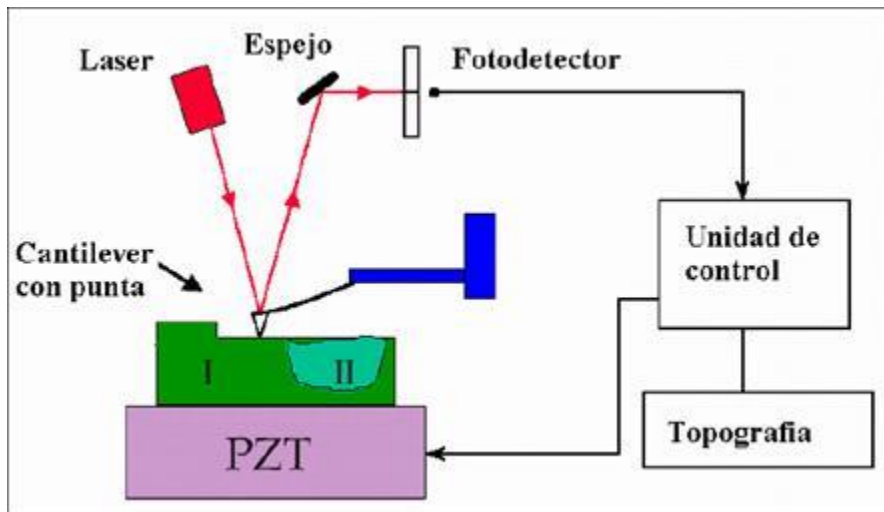


Figura 1. Representación Esquemática del funcionamiento del AFM.

Los resultados del equipo se puede graficar, como se ve en la figura 2 y puede verse fácilmente que al área bajo la curva es un trabajo de adhesión W_{adh} .

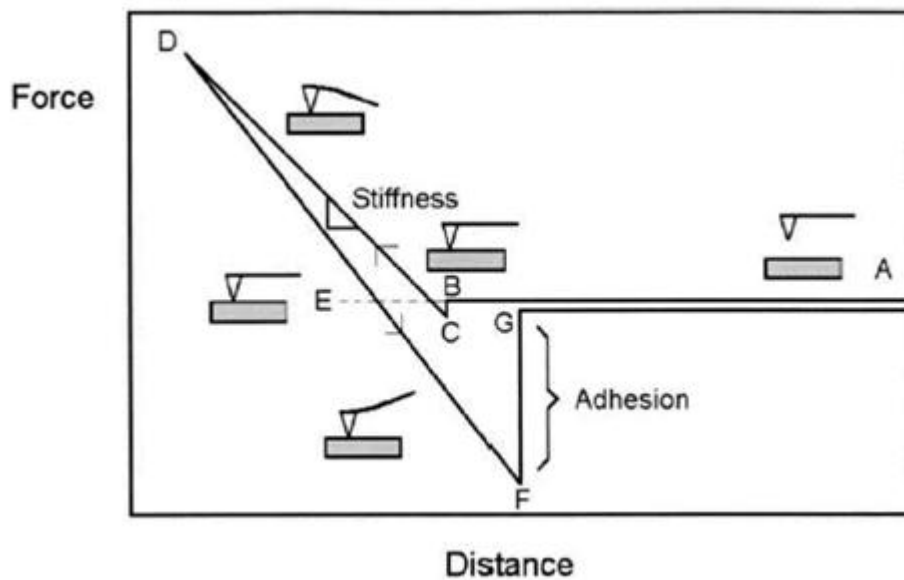


Figura 2. Representación grafica de los resultados de MFA

El reporte grafico diferencia el ciclo de carga, esto es, de acercamiento a la superficie y el ciclo de descarga, esto es, de alejamiento de la superficie.

La diferencia de las áreas bajo la curva, es una medida del trabajo, en su parte negativa es un trabajo realizado en contra de las fuerzas de repulsión en la superficie, mientras que en su parte positiva es el trabajo realizado en contra de las fuerzas de atracción, las cuales podemos considerar como las fuerzas de dispersión de London.

Dado que la adsorción modifica fuertemente las fuerzas diferentes a las de dispersión de London, deberá modificar substancialmente la curva.

2. Experimental

Se realizaron ensayos de AFM a muestras de oro de diferentes génesis, uno proveniente de un depósito vetiforme y otro de un depósito de aluvión. Las muestras de oro en un intervalo de tamaño entre 2000 a 900 micrómetros (ver figura 3). Las partículas de oro fueron sometidas a medición y paralelamente se les midió el ángulo de contacto y se realizaron ensayos de flotación en celda Hallimond en diferentes escenarios fisicoquímicos (pH y tipo de reactivos colectores).

Los reactivos colectores usados fueron Aero 3501 y el S-8478 de marca registrada Cytec.

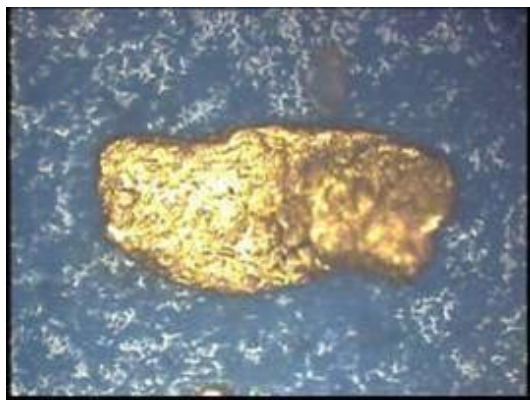


Figura 3. Grano de oro sometido a medición en MFA

Para las muestras con sustancia tensoactivas adsorbida se procedió con una previa humectación a los granos con el suficiente tiempo de acondicionamiento para hacer la medición.

La medición del ángulo de contacto se efectuó Equipo OCA SISTEM, basado en el método de la gota en reposo.

3. RESULTADOS

Las partículas de oro sin tratamiento previo, al ser sometidas a tratamiento previo tuvieron un ángulo de contacto de 46° , y la curva de fuerzas de superficie se reporta en la figura 4.

La determinación del área bajo la curva en la sección tiene una magnitud de 1.84 dinas-cm, lo cual coincide con la condición fisicoquímica de hidrofobicidad del oro.

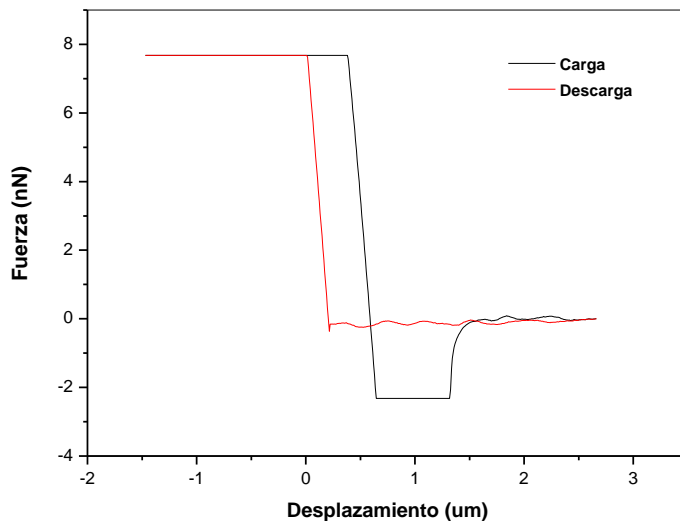


Figura 4. Grafica de AFM para partículas de oro obtenidas en la descarga de molino sin tratamiento previo. ($\theta = 46^\circ$)

Cuando se usan el reactivo A3501 solamente, se obtiene la curva de la figura 5, la cual se compara también con su respectivo ángulo de contacto. El área bajo la curva tiende a cero, lo cual coincide con la recuperación cercana al 60%.

Los resultados con una mezcla de los reactivos Aero 3501 y el S-8478, los cuales generan una recuperación de oro libre del 97%, y la grafica del AFM es la figura 6

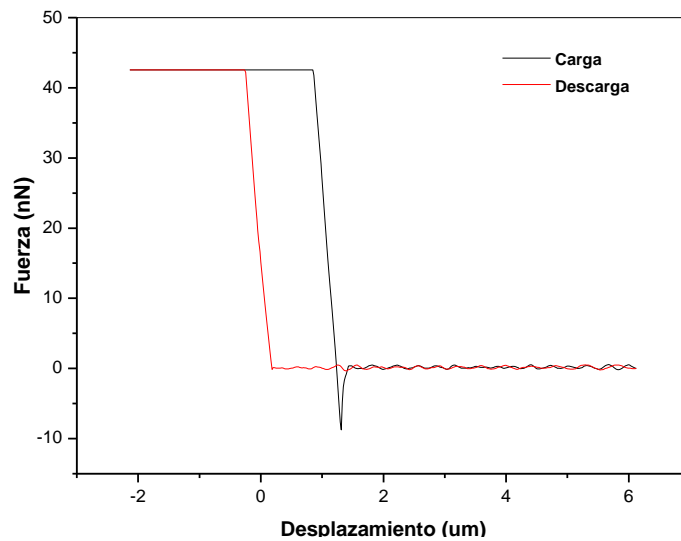


Figura 5. Gráfica de AFM para partículas de oro sometidas a tratamiento con A3105 ($\theta = 78^\circ$, Recuperación R = 60%).

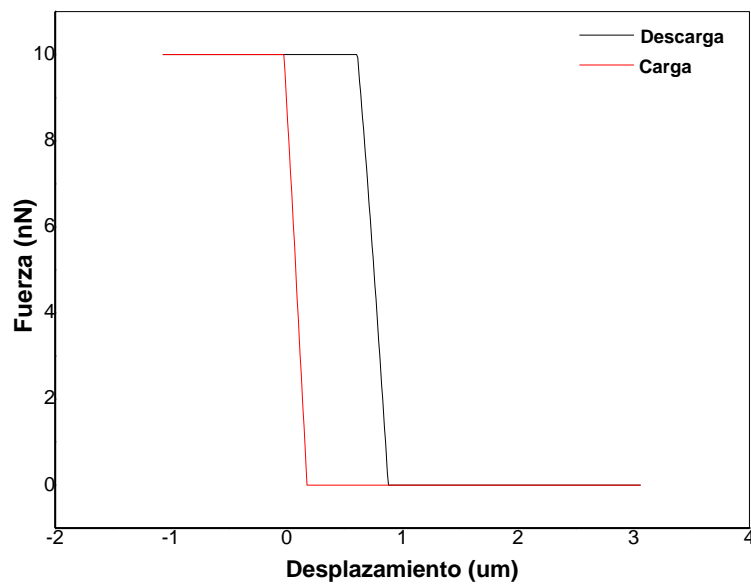


Figura 6. Gráfica de AFM para partículas de oro sometidas a tratamiento con A3105 ($\theta = 90^\circ$, Recuperación R = 95%).

5. CONCLUSIONES

1. El procedimiento de medir la fuerza superficial usando MFA, coincide con la estimación de hidrofobicidad.
2. La región positiva del diagrama de AFM, corresponderá a la componente de la energía libre superficial generada por la fuerzas de dispersión de London.
3. Existe una excelente correlación entre el ángulo de contacto, la recuperación y la disminución n de la región negativa del AFM