







## Comportamiento de la flotación de pirargirita sin colector

### Behavior of the collectorless flotation of pyrargyrite

M. Reyes Pérez <sup>a,\*</sup>, F. R. Barrientos Hernández <sup>a</sup>, M. Pérez Labra <sup>a</sup>, J. C. Juárez Tapia <sup>a</sup>  
I. A. Reyes Domínguez <sup>b</sup>, M. U. Flores Guerrero <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78210, San Luis Potosí, México.

<sup>c</sup> Área de Electromecánica Industrial, Universidad Tecnológica de Tulancingo, 43642, Tulancingo, Hidalgo, México.

#### Resumen

La pirargirita  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$  es un mineral tipo sulfosal rico en plata, presente en los yacimientos de sulfuros de Cu, Pb y Zn, la cual no se recupera individualmente y flota junto con los metales base, la plata de este mineral se elimina en la escoria durante la fusión. Por tal razón en este trabajo de investigación, se estudia la flotación de pirargirita sin colector con la finalidad de aportar información para la separación selectiva de este mineral. Los resultados encontrados muestran que la flotación de pirargirita se puede llevar a cabo sin colector empleando solamente espumante 60 mg/L. El pH juega un papel muy importante y se obtiene mayor eficiencia de flotación a pH 6 y 10 con alrededor del 66 % w/w de separación. Los valores ácidos 2, 2.54 y 4.97 deprimen la flotación del mineral. La depresión superficial se atribuye a la fuerte intensidad de las bandas de absorción, del ion sulfato e hidroxilo  $\text{OH}^-$  dándole un carácter hidrofílico a la superficie. Mientras la activación superficial de la pirargirita se atribuye a la oxidación de los componentes metálicos formando enlaces Sb-O y Ag-O especies determinadas mediante infrarrojo.

#### Palabras Clave:

Flotación sin colector, pirargirita, activación, hidrofílico, FTIR.

#### Abstract

Pyrargyrite  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$  is a sulfosal-type mineral rich in silver present in the deposits of Cu, Pb and Zn sulfides, which is not recovered individually and floats together with the sulfides, the silver of this mineral is eliminated in the slag during fusion. For this reason, this work studies the collectorless flotation of pyrargyrite to provide information for the selective separation of this mineral. The results found show that the flotation of pyrargyrite can be carried out without a collector only using 60 mg / L frother agent. The pH plays an important role and greater flotation efficiency is obtained at pH 6 and 10 with around 66% w/w separation. The acid values 2, 2.54 and 4.97 depress the flotation of the mineral. The surface depression is attributed to the strong intensity of the absorption bands, of the sulfate ion and hydroxyl  $\text{OH}^-$  giving a hydrophilic character to the surface. While the surface activation is attributed to the oxidation of the metallic components forming bonds Sb-O and Ag-O species determined by infrared.

#### Keywords:

Collectorless flotation, pyrargyrite, activation, hydrophilic, FTIR.

#### 1. Introducción

Actualmente, la flotación, es el proceso de concentración y separación selectiva de los sulfuros minerales de metales base (cobre, plomo y zinc) más empleado en todo el mundo (Wills et al., 2016). En México los yacimientos minerales tipo sulfuros contienen además fases ricas en plata como la pirargirita  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ , esta se puede encontrar en los estados de Guanajuato, Guerrero, Oaxaca y Zacatecas (García et al., 1991). Sin embargo, hasta ahora no se ha abordado el estudio del comportamiento de la flotación de pirargirita sin colector. En la actualidad este mineral flota y se separa junto con el resto de los sulfuros metálicos de valor comercial y durante la extracción por fusión del metal base, la plata de la pirargirita pasa a formar parte de la escoria la cual debe reprocesarse para recuperar la plata generando

consumos de energía extra y contaminación ambiental debido a la generación de óxidos y sulfuros de antimonio gaseosos  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (g) (1160 °C) y  $\text{Sb}_4\text{O}_6$  (g) (1456 °C). Por tal razón en este trabajo se investiga la flotación sin colector de esta especie rica en plata. La pirargirita cristaliza en el sistema trigonal y es un mineral tipo sulfosal, este término describe un compuesto conteniendo oxígeno sin embargo en la pirargirita este, se sustituye por el antimonio. Los minerales sulfosales tienen como fórmula general  $\text{A}_x\text{X}_y\text{S}_z$ . Donde "A" representa al metal en la fórmula (por ejemplo:  $\text{Ag}^{1+}$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{1+}$ ,  $\text{Pb}^{1+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ), "X" se asigna al  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{Sb}^{3+}$ ,  $\text{Bi}^{3+}$ , o  $\text{Te}^{4+}$ , y S para el azufre (František et al., 2010). La pirargirita pura contiene 59.76 % w/w de plata, 17.76 % w/w de azufre y 22.48 % w/w de antimonio (García et al., 1991). En lo que respecta a la flotación de los sulfuros sin emplear colector, este proceso se llega a alterar con la susceptibilidad superficial de

\*Autor para la correspondencia: mreyes@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes-Pérez), frbh68@hotmail.com (Francisco Raúl Barrientos-Hernández), miguellabra@hotmail.com (Miguel Pérez-Labra), jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio Cesar Juárez Tapia), alejandro.reyes@uaslp.mx (Iván Alejandro Reyes Domínguez), mlflores@uteculancingo.edu.mx (Mizraim Uriel Flores Guerrero).

estos minerales a oxidarse, y su hidrofobicidad se ve afectada por la modificación causada por la marcada presencia de hidróxidos metálicos creando una superficie mayormente hidrofílica (Fairthorne et al., 1997). La flotación sin colector se basa en el control de la tensión superficial del medio de flotación (agua) y aprovechando las diferencias en mojabilidad (hidrofobicidad) se pueden separar selectivamente los minerales de interés (Yekeler et al., 1997).

### 1.1. Estudios previos de la flotación sin colector.

El pH de la pulpa de flotación afecta en la flotabilidad de los sulfuros minerales y es un parámetro muy documentado para minerales como la esfalerita, la calcopirita, galena, entre otros, (Hayes et al., 1988), (Luttrell et al., 1984), (Fornasiero et al. 2006) más no para la pirargirita. Las altas eficiencias de flotación reportadas en la literatura se atribuyen al estado superficial del mineral con características preferentemente hidrofóbicas resultado de una superficie rica en azufre, mientras que las bajas recuperaciones se deben al incremento de la formación de compuestos hidrofílicos tales como hidróxidos metálicos los cuales se forman sobre las superficies de los sulfuros debido a la oxidación o por el efecto de la interacción galvánica con los medios de acero durante la molienda (Fornasiero et al., 2006). En la literatura se ha reportado la flotación sin colector de diferentes sulfuros, por ejemplo, de la esfalerita reportando bajas eficiencias de flotación en presencia de iones metálicos como el cobre proveniente de una sal de Nitrato, esto a pH entre 8 y 10, con concentraciones de  $2 \times 10^{-5}$  M (Fornasiero et al., 2006). Por otro lado, la flotación sin colector también se ve influida por el valor del potencial de pulpa  $E_h$ , la variación del  $E_h$  durante el proceso, es un indicativo de la oxidación superficial y precipitación de hidróxidos metálicos sobre la superficie mineral (Luttrell et al., 1984). Por tal razón en este trabajo de investigación se estudia el comportamiento de la flotación de pirargirita sin colector en función del pH y del potencial de pulpa con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos de separación.

## 2. Desarrollo experimental

Para realizar este estudio de investigación se empleó un mineral de pirargirita natural proveniente de la minera Bolañitos, localizada en Guanajuato, México. Macroscópicamente se observa que el mineral está constituido por una sola fase, las partículas de alrededor de 0.5 mm, se pulverizaron en un mortero de ágata, el tamaño de partícula usado en las pruebas de flotación se caracterizó en un equipo marca Beckman Coulter modelo LS 13 320 por difracción láser. Previo al pulverizado final se retiró una muestra representativa del mineral y se caracterizó por las técnicas instrumentales como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido en conjunto con microanálisis por dispersión de energías (EDS) y espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), para este análisis se prepararon pastillas constituidas por 0.3 g de bromuro de potasio KBr y 0.003 g de mineral mezclados y comprimidos en una prensa hidráulica a 15 psi técnica descrita en la literatura (Nakamoto 2008).

Las pruebas de flotación se realizaron en una celda Denver sub-aireada de laboratorio de 1 L de capacidad, fabricada en acero inoxidable, empleando un difusor y un impulsor alojados en el fondo de la celda, este último con una velocidad de agitación de 1200 revoluciones por minuto. El aire usado para generar las burbujas necesarias para el proceso de flotación se succionó por efecto del movimiento del impulsor hacia la celda. Para todas las pruebas de flotación se empleó agua desionizada, hidróxido de

sodio y ácido sulfúrico diluido 1 M para ajustar el valor del pH alcalino u ácido respectivamente según fuera el caso.

Previo a las pruebas de flotación se acondicionó la pulpa monitoreando, al inicio y al final de cada experimento tanto el pH como el potencial óxido reducción ORP (mV), empleando un potenciómetro, Thermo Scientific Orion 3 Star equipado con un electrodo de pH, Ross ultra triode provisto con sensor de temperatura.

### 2.1 Procedimiento Experimental.

Para cada una de las pruebas de flotación se emplearon cuatro gramos de mineral y 1 L de agua. La etapa de acondicionamiento se llevó a cabo dentro de la celda de flotación, generalmente esta etapa se inició agregando al agua la concentración de espumante propilenglicol 60 mg/L proveído por Alkemin S.A. de S.R.L., posteriormente el mineral, para finalmente ajustar el pH deseado ya sea en condiciones ácidas u alcalinas. En cada etapa se midió el pH y el potencial óxido reducción ORP de sus siglas en inglés "oxide-reduction potential", el valor medido con el potenciómetro fue referido a su valor del electrodo estándar de hidrógeno (EEH) con sus siglas en inglés SHE (Standard Hydrogen Electrode) mediante la adición de +245 mV al valor medido y así expresar los valores como potenciales de pulpa  $E_h$  (mV) (Hayes et al., 1988).

En cada modificación de la química de la pulpa se dio un tiempo de acondicionamiento de 3 minutos, una vez concluido se procedió a medir las variables fisicoquímicas mencionadas. Después del acondicionamiento se inició la prueba, los tiempos de colección del concentrado se establecieron en 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 minutos de flotación sin colector.

Alrededor de quince segundos antes de concluir cada tiempo de flotación, se abrió la válvula de entrada de aire para la formación de burbujas, cabe citar que estas, son el vehículo de transporte de las partículas hidrófobas desde el seno de la pulpa a la cama de espuma y su posterior derrame de la celda (Wills et al., 2016), la salida de la espuma se apoyó por medio del arrastre usando un dispositivo de material inerte.

El derrame de espuma con las partículas de pirargirita se colectó en charolas de material inerte previamente pesadas, el concentrado húmedo obtenido en cada tiempo de flotación se dejó secar a temperatura ambiente, para pesarlo nuevamente y por diferencia de peso obtener la cantidad en gramos de pirargirita flotada en cada tiempo de flotación. Cabe mencionar que, al tratarse de un mineral constituido generalmente de una sola y mayoritaria fase, las eficiencias de flotación se establecieron en base a la cantidad de gramos de pirargirita flotada en cada tiempo propuesto. Para obtener el porcentaje de pirargirita flotada en cada tiempo de flotación se empleó la ecuación (1)

$$\% w/w F = \frac{W_c - W_v}{4} * 100 \quad (1)$$

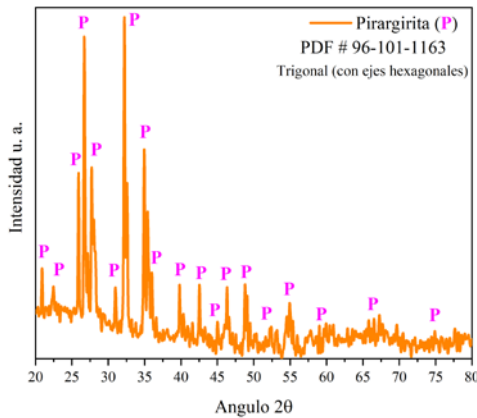
Donde % w/w F es el porcentaje en peso de pirargirita flotada,  $W_c$  es el peso de la charola conteniendo el concentrado seco,  $W_v$  es el peso de la charola vacía pesada antes de la prueba de flotación, el valor 4, es la cantidad en gramos de mineral usado y 100 para expresar el valor en porcentaje. Para el pesado de las charolas sin y con concentrado se usó una balanza analítica de cuatro dígitos, esto permite establecer con precisión la cantidad (g) de pirargirita flotada en ausencia de colector. El procedimiento anteriormente descrito se efectuó para cada una de las pruebas realizadas en este trabajo de investigación. La finalidad de no

emplear colector es para referir los resultados de flotación en base al estado superficial del mineral de pirargirita.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Caracterización de la pirargirita.

Antes de las pruebas de flotación y previo al pulverizado final del mineral de pirargirita se retiró una muestra representativa de las partículas y se caracterizaron por las técnicas anteriormente descritas. La figura 1 muestra el difractograma de rayos X de la pirargirita, lo cual indica a esta fase cristalina como la especie mayoritaria. La pirargirita se identificó con el PDF # 96-101-1163 con estructura cristalina trigonal con ejes hexagonales.



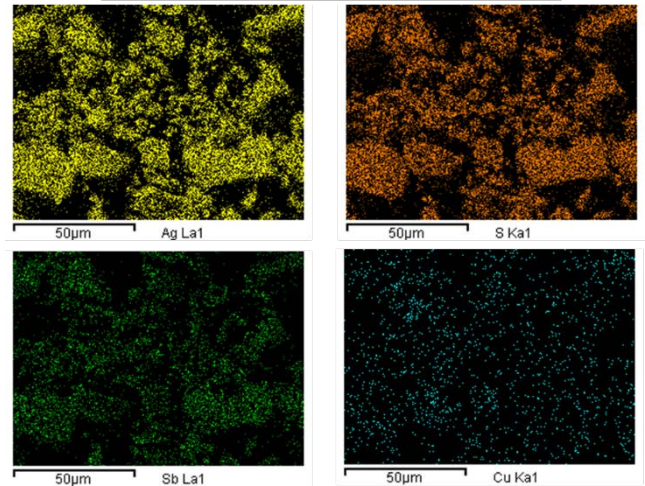
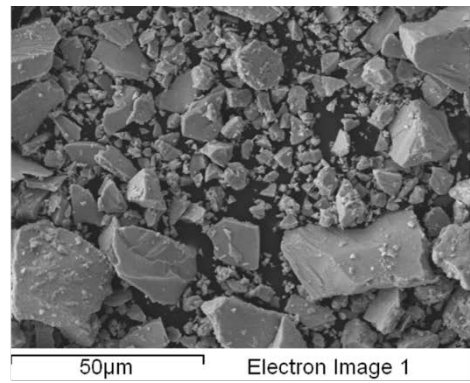
**Figura 1.** Espectro de difracción de la muestra mineral de pirargirita indexada con el # PDF 96-101-1163.

El análisis de MEB-EDS y mapeos elementales se presenta en la figura 2 y 3. En la figura 2 se observan las partículas en una amplia variedad de tamaños, constituidas de superficies lisas y bordes angulados, en algunas se puede apreciar la fractura irregular concoidea típica de un sistema cristalino trigonal.

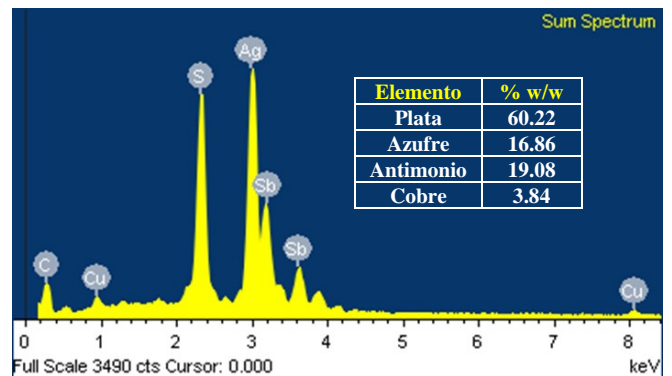
Los mapeos elementales de la figura 2 además de relevar los elementos constituyentes de la pirargirita, plata, azufre y antimonio también muestra la presencia de cobre, el oxígeno no se presentó en suficiente proporción para ser detectado. El microanálisis por dispersión de energías de la figura 3, indica que la pirargirita usada, está constituida principalmente de plata y antimonio, en esta figura se presentan además los porcentajes en peso de Ag siendo 60.22% w/w, 19.08% w/w de Sb, 16.86% w/w para el S, y 3.84% w/w de Cu. El análisis del tamaño de partícula (ATP) por difracción láser de la pirargirita obtenida en el pulverizado final usada para las pruebas de flotación indica una población de partículas promedio en alrededor de 34 micras (µm).

#### 3.2 Efecto del pH en la flotación de pirargirita sin colector.

Las curvas del comportamiento del % w/w de flotación en función del tiempo, se presentan en la figura 4. A pH inicial 6 y 10 se obtuvieron las mejores eficiencias de separación (66.44 y 67.39 % w/w respectivamente), cabe mencionar que los porcentajes de flotación reportados están en función del peso de pirargirita flotada en cada tiempo preestablecido. Se observa que a los cuatro minutos de flotación el % w/w de separación alcanzado es de alrededor del 60.8 %, por lo que la flotación de partículas de pirargirita después de este tiempo es mínima



**Figura 2.** Micrografía de MEB y mapeos elementales de las partículas de pirargirita.



**Figura 3.** Espectro y microanálisis por dispersión de energías (EDS).

Esto se debe al efecto de aireación de la celda, oxidando los elementos metálicos de la pirargirita formando hidróxidos sobre la superficie del mineral los cuales tienen características hidrofílicas, causando la disminución de la hidrofobicidad del mineral y por tal, su capacidad de flotación. El comportamiento anteriormente descrito, se presenta generalmente en todas las pruebas de flotación variando el pH inicial del proceso. Durante el acondicionamiento de las pruebas de flotación se monitoreo el valor del pH.

La figura 5 muestra los valores registrados en cada una de las etapas; cuando solamente contiene agua desionizada (H<sub>2</sub>O), espumante (e) y el mineral, al ajustar el pH inicial de flotación y el valor final obtenido después de los 10 minutos del proceso de separación. Cuando el pH inicial es muy ácido (2 y 2.54) este prácticamente permanece sin cambios al finalizar la prueba.

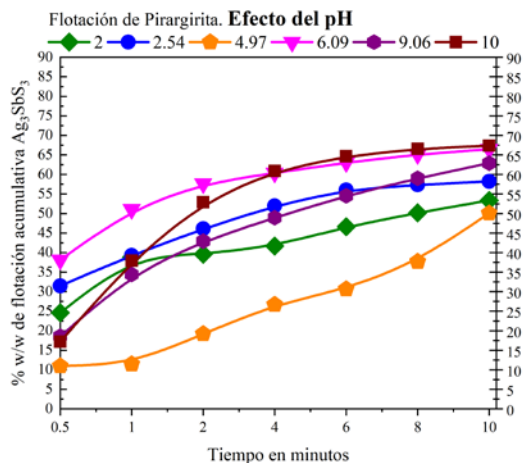


Figura 4. % w/w de flotación acumulativa de Ag<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub> en función del tiempo (minutos). Efecto del pH.

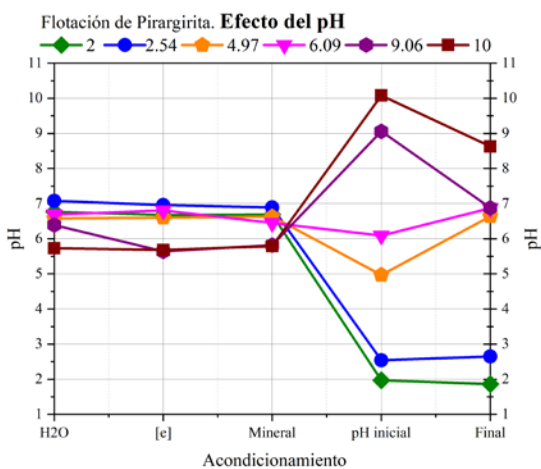


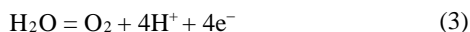
Figura 5. Comportamiento del pH durante el acondicionamiento, al inicio y final de la flotación. Efecto del pH.

Cabe citar que el pH en estos casos se ajustó con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado. En cambio, cuando el pH inicial de flotación sin colector es de 4.97 y 6.09, al concluir las pruebas, el pH de la pulpa tiende a incrementar, esto debido a la producción de iones hidroxilo OH<sup>-</sup> como indica la reacción 2 en la cual se establece la reducción del ion de oxígeno e hidrógeno para formar hidroxilo.



$$\Delta G^{\circ} = -41.493 \text{ Kcal}$$

Por otra parte, cuando el pH inicial de la prueba es muy alcalino este tiende a disminuir al concluir la flotación, esto es debido a la descomposición de las moléculas de agua en oxígeno gaseoso y ion hidrogeno como se muestra en la reacción (3).



$$\Delta G^{\circ} = -56.678 \text{ Kcal/mol}$$

La formación de ion hidrógeno H<sup>+</sup> disminuye el pH, tal como se muestra en la figura 5. Junto con el pH, también se monitoreo durante el acondicionamiento y la flotación, el potencial óxido reducción (ORP) mV empleando un electrodo con solución de yoduro de potasio IK 3.3 M, los valores registrados, se expresaron y graficaron en referencia al electrodo estándar de hidrógeno EEH con sus siglas en inglés SHE (Standard Hydrogen Electrode), mediante la adición de + 245 mV al valor medido, tal como se cita en la bibliografía (Hayes 1988).

La figura 6 muestra los valores del potencial de pulpa Eh (mV) referido al electrodo estándar de hidrógeno en función de la etapa de acondicionamiento, al inicio y al final de la flotación. Las mejores eficiencias de recuperación se obtienen cuando el potencial de pulpa Eh es de alrededor de + 100 mV, el cual es un potencial oxidante, el aumento de Eh hacia valores más positivos implica la disminución del % w/w de flotación, no obstante, la amplia diferencia de los valores de potencial de pulpa Eh de la prueba llevada a cabo a pH 10 con un 67.4 % w/w flotación respecto a la realizada a pH 2.0 con un 53.3 % w/w flotación, de alrededor de + 400 mV, la recuperación de pirargirita difiere solo un 17 % w/w.

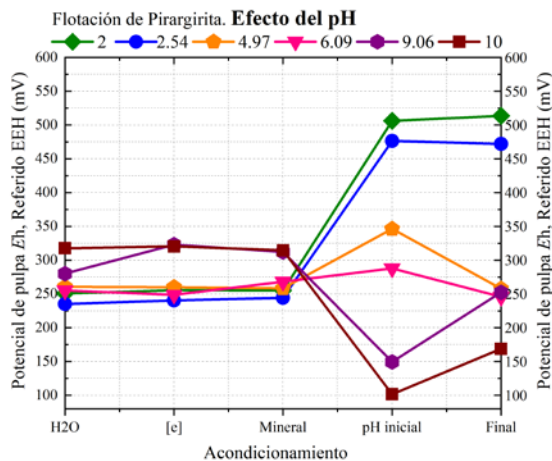


Figura 6. Potencial de pulpa Eh Vs la etapa de acondicionamiento, inicio y final de la flotación.

El potencial de pulpa en estas pruebas es oxidante con valores de potencial positivos es decir los elementos contenidos en el mineral tienden a perder electrones y oxidarse, pasar a solución y por efecto del pH pueden llegar a precipitar sobre la superficie del mineral como hidróxidos, o hidroxisulfatos y afectar la hidrofobicidad superficial, este efecto se ha reportado en la literatura para otros sulfuros minerales (Fornasiero et al., 2006).

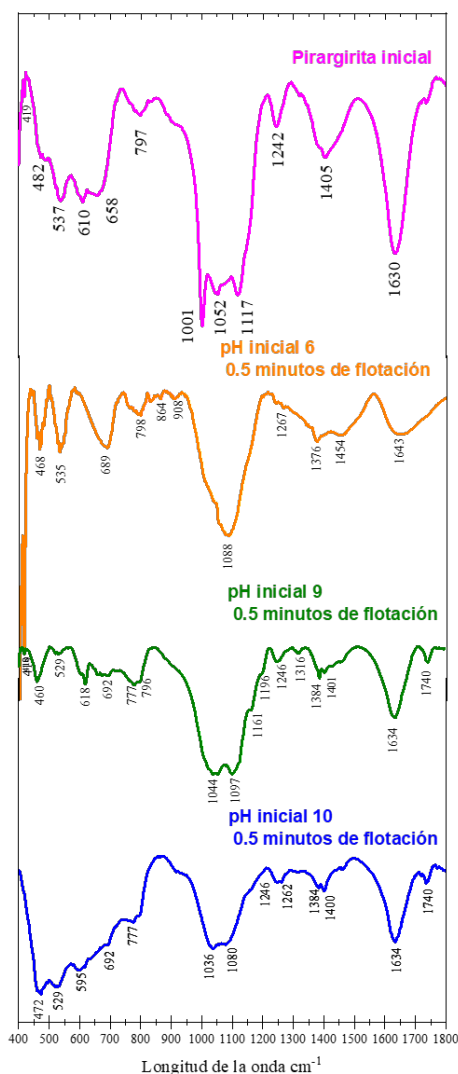
El potencial de pulpa es un parámetro importante en los procesos de flotación y junto con el pH controlan el aumento o disminución de la eficiencia de flotación para este trabajo de investigación de flotación sin colector de pirargirita, potenciales muy oxidantes mayores + 450 mV deprimen la superficie del mineral y disminuye el porcentaje de flotación.

### 3.3 Caracterización superficial de pirargirita por FTIR.

El proceso de flotación involucra diversos aspectos para lograr las mejores eficiencias de separación entre ellos la química de la pulpa, la hidrodinámica del proceso y el estado superficial de las partículas de mineral a ser flotadas. En esta sección se presentan los resultados encontrados en el análisis vía infrarrojo del estado que guardan las superficies de pirargirita bajo diferentes ambientes químicos de la pulpa.

Para llevar a cabo el análisis de la superficie de la pirargirita obtenida en la flotación generalmente se analizaron las partículas concentradas en 0.5 y 10 minutos de flotación, para ello, se prepararon las muestras como se describió en la sección experimental. La figura 7 muestra los espectros de la pirargirita inicial sin tratamiento y la obtenida en 0.5 minutos de flotación a pH inicial 6, 9, 10. Cabe citar que las máximas eficiencias de separación para estas pruebas fueron 66 % w/w, 62 % w/w y 67

% w/w, respectivamente. Se observa mucha similitud en las bandas de absorción encontradas para estas pruebas, esto se relaciona con la escasa diferencia en el porcentaje de recuperación obtenido. Los enlaces Sb - O producidos por la oxigenación de la pulpa y las condiciones químicas, presentan múltiples bandas de absorción localizadas en  $529\text{ cm}^{-1}$ ,  $689\text{ cm}^{-1}$ ,  $798\text{ cm}^{-1}$ ,  $908\text{ cm}^{-1}$ ,  $1376\text{ cm}^{-1}$ . Mientras las bandas localizadas en alrededor de  $1000$  a  $1200\text{ cm}^{-1}$ , corresponden a los enlaces S - O del ion sulfato previamente citadas (Nakamoto 2008), (Miller 1952), de la figura 7 se tiene que las partículas flotadas a pH 9 y 10 exhiben bandas de absorción de poca intensidad, en alrededor de  $1036\text{ cm}^{-1}$  y  $1080\text{ cm}^{-1}$ , el inicio de la división de la banda principal indica la formación de compuestos de sulfatos coordinados con el metal, la presencia de tres bandas muestra al metal coordinado con el oxígeno de manera mono dentada, cuatro bandas de absorción se asignan a un compuesto bidentado donde dos átomos de oxígeno del sulfato se combinan con uno del metal (Reyes 2013).



**Figura 7.** Espectros de infrarrojo FTIR de las partículas de pirargirita inicial y las obtenidas en 0.5 minutos de flotación a diferentes valores pH.

Mientras, las partículas de pirargirita flotadas a pH 6.0 exhiben una única y fuerte banda de absorción correspondiente al sulfato en alrededor de  $1088\text{ cm}^{-1}$ , generalmente todas las bandas de absorción detectadas para esta prueba exhiben mayor intensidad

resultado de una más grande proporción de los enlaces Sb-O. Solo en este espectro se presentan algunas débiles bandas de absorción en  $468\text{ cm}^{-1}$ ,  $864\text{ cm}^{-1}$ ,  $908\text{ cm}^{-1}$ , atribuidas a los enlaces Ag - O descritos previamente (Nakamoto 2008). La banda en  $1740\text{ cm}^{-1}$  se asigna a los enlaces Na - O (Miller 1952). En  $1634\text{ cm}^{-1}$  se detectó la presencia de moléculas de agua enlazadas a la superficie del mineral mediante la banda correspondiente a los iones hidroxilo  $\text{OH}^-$  citados anteriormente (Nakamoto 2008). La presencia de esta especie enlazados con el metal genera los hidróxidos responsables de disminuir la hidrofobicidad del mineral y obtener las eficiencias de flotación anteriormente citadas.

#### 4. Conclusiones

El mineral empleado en este trabajo experimental se trata de una fase mayoritaria de pirargirita con contenidos de 60.22 % w/w de plata (Ag), 19.08 % w/w de antimonio (Sb), 16.86 % w/w de azufre (S) y 3.84 % w/w de cobre (Cu).

Las partículas de pirargirita usadas para las pruebas de flotación presentan la oxidación del azufre a compuestos monodentados enlazado con el metal en forma de sulfato metálico y la formación de enlaces M-O del Sb-O y Ag-O bandas de enlace detectadas por FTIR. La flotación de pirargirita sin colector se puede llevar a cabo en un amplio rango de pH y potenciales de pulpa (*Eh*) oxidantes. El pH óptimo de flotación es 10 y se tiene una eficiencia de flotación del 67.4 % w/w con valores de *Eh* de + 100 mV. En tanto a pH de flotación ácido 2, 2.54 y 4.97 los porcentajes en peso de recuperación acumulativa son 53 % w/w, 58 % w/w y 50 % w/w, con potenciales de pulpa de + 345 mV, + 476 mV y + 506 mV.

La alteración superficial (cambio de una superficie hidrofóbica a una hidrofílica) de la pirargirita se estudió mediante el análisis de FTIR, se encontró que la intensidad de las bandas de enlace del Sb-O incrementan en la superficie del mineral de pirargirita flotada a pH 6 y 10, generando una superficie mayormente hidrofóbica y aumentando la eficiencia de flotación. Mientras los hidróxidos metálicos formados superficialmente detectados por la presencia del ion  $\text{OH}^-$  en la superficie del mineral disminuye la hidrofobicidad del mineral y por tal la eficiencia de flotación.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del programa para el desarrollo del personal docente PRODEP y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo UAEH.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### Referencias

- Fairthorne G., Fornasiero D. & Ralston J. (1997). Effect of oxidation on the collectorless flotation of chalcopyrite. *International Journal of Mineral Processing*, 49 (1-2), 31-48.
- Fornasiero D. & Ralston J. (2006). Effect of surface oxide/hydroxide products on the collectorless flotation of copper-activated sphalerite. *Int. J. Miner. Process.* 78, 231- 237.
- František Laufek, Jiří Sejkora, Michal Dušek. (2010). The role of silver in the crystal structure of pyrargirite: single crystal X-ray diffraction study. *Journal of Geosciences*, 55, 161-167.

- García M. E., Querol S. F. & Lowther G. K. (1991). Geology of the Fresnillo mining district, Zacatecas. In 'Economic Geology, Mexico' (Salas, G. P. editor), GSA DNAG volume P-3, 438pp., 383-394.
- Hayes R. A. & J. Ralston. (1988). The collectorless flotation and separation of sulphide minerals by Eh control. *International Journal of Mineral Processing*. 23 (1). 55-84.
- Luttrell G. & Yoon R. (1984). Surface studies of the collectorless flotation of chalcopyrite. *Colloids and surfaces*. 12. 239-254.
- Miller F. A. and Wilkins C. H. (1952). Infrared Spectra and Characteristic Frequencies of Inorganic Ions. *Anal. Chem.* 24. 8. 1253-1294.
- Nakamoto K. (2008). *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds, Theory and Applications in Inorganic Chemistry*. John Wiley & Sons, Hoboken New Jersey 6<sup>th</sup> Ed.
- Reyes Pérez M. (2013). *Modificación superficial de mineral de pirita y precipitados de Hierro: comportamiento en medios acuosos y de molienda*. Tesis doctoral. Morelia Michoacán México.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Froth Flotation*. Wills' Mineral Processing Technology. Oxford UK. 8 Ed. pp 280-380.
- Yekeler M. (1997). Effect of the hydrophobic fraction and particle size in the collectorless column flotation kinetics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 121 (1). 9-13.