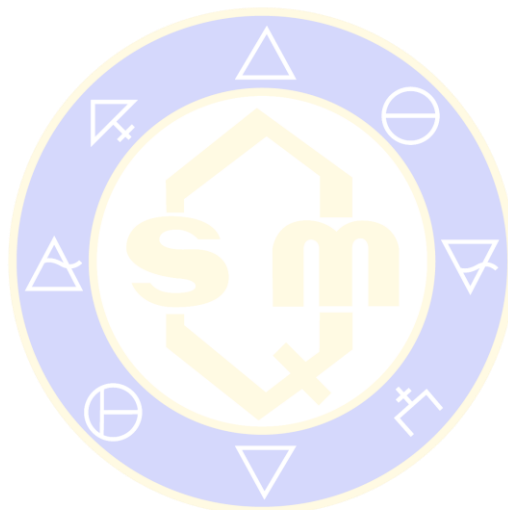


## CONTENIDO

Estudio de adsorción del colector Isobutilo Xantógeno Etil Formiato, en la superficie de sulfuro de cobre y su correlación en el proceso de flotación.....	821
Efecto del medio en la digestión ácida asistida por microondas de minerales para la cuantificación de Au .....	826



SOCIEDAD QUÍMICA  
DE MÉXICO, A.C.  
*“La química nos une”*

## Estudio de adsorción del colector Isobutilo Xantógeno Etil Formiato, en la superficie de sulfuro de cobre y su correlación en el proceso de flotación

**Delia Monserrat Ávila Márquez<sup>1</sup>**, Iván Alejandro Reyes Domínguez<sup>1,2</sup>, Alien Blanco Flores<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Metalurgia-Universidad Autónoma de San Luis Potosí, C.P. 78210 San Luis Potosí, S.L.P. México. monse\_ang19@hotmail.com

<sup>2</sup> Catedrático CONACYT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, C.P. 03940, Cd. de México, México

<sup>3</sup> División de Ingeniería Mecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-Marquesa Km 22, Santiago Tilapa, C.P. 52650, Santiago Tianguistenco, Estado de México, México

## Resumen

Los xantógeno formiatos (colectores para sulfuros metálicos) son estables en circuitos ácidos de flotación, a diferencia de los colectores xantatos, los cuales se descomponen en soluciones ácidas. Así, el uso de colectores xantógeno formiatos (XF) resulta en un sustancial ahorro de cal típicamente usada para alcanzar valores de pH  $\approx$  10.5. Aunque los XF parecen ser una excelente opción, actualmente existe escasa información sobre la evaluación del uso de los XF en la flotación de valores metálicos o cualquier otra fase y por lo tanto no existe información sobre los mecanismos de adsorción en la interface sólido-líquido y su efecto en el desarrollo de la flotación. El principal objetivo de esta investigación es estudiar los mecanismos de interacción de sulfuro de cobre con dos colectores de XF en medio ácido para su uso en la recuperación de cobre.

## Introducción.

Los principales minerales de sulfuro de cobre son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), tetraedrita ( $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). La fuente principal de cobre son los depósitos de mineral pórfido que es la combinación de los minerales antes mencionados. Un mineral de sulfuro de cobre contiene varios niveles de sulfuro de hierro que generalmente incluyen pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ).

Los reactivos estándar de colectores de flotación son colectores de clase tiol con base de sulfuro que pueden agruparse en las principales familias de xantato, ditiofosfato, tionocarbamato y tiocarbamato (Cheminova Danna Float). El problema principal que conlleva el uso de estos colectores es que estos son inestables en medio ácido, por lo que es necesario buscar y probar nuevas alternativas de usos de colectores que puedan mejorar la recuperación de valores metálicos, sin la necesidad de realizar etapas de neutralización.

Ha sido demostrado que los xantógeno formiatos (colectores para sulfuros metálicos) son estables en circuitos ácidos de flotación, a diferencia de los colectores xantatos, los cuales se descomponen en soluciones ácidas. Así, el uso de colectores xantógeno formiatos (XF) resulta en un sustancial ahorro de cal típicamente usada para alcanzar valores de pH  $\approx$  10.5. (Ackerman, 2000)

Aunque los XF parecen ser una excelente opción, actualmente existe escasa información sobre la evaluación del uso de los XF en la flotación de valores metálicos o cualquier otra fase y por lo tanto no existe información sobre los mecanismos de adsorción en la interface sólido-líquido y su efecto en el desarrollo de la flotación. El principal objetivo de esta investigación es estudiar los mecanismos de interacción de sulfuros de cobre con dos colectores de XF en medio ácido para su uso en la recuperación de cobre.

## Metodología

El mineral se caracterizó antes y después de la adsorción, mediante las técnicas de MEB, FT-IR, DRX, XPS y EAA.

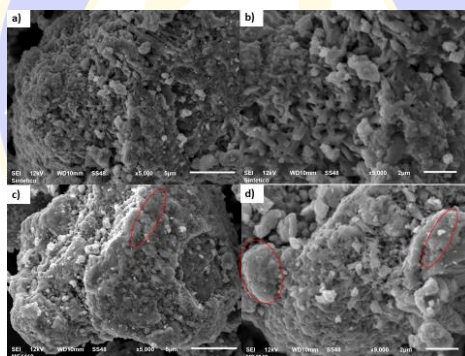
Posteriormente se obtuvo el tiempo de equilibrio y la capacidad de máxima adsorción mediante la obtención de cinéticas e isotermas de adsorción. En la cinética se puso en contacto una determinada cantidad del mineral con un volumen de la solución del colector a una concentración de 20 mg/L. Cada intervalo de tiempo, se retiró una muestra, y se cuantificó la cantidad de colector no adsorbido, a través de UV-vis a una longitud de onda de 274 nm. Él estudió se siguió variando el pH de trabajo entre 2, 4 y 6.

Para la isoterma de adsorción se puso en contacto una determinada cantidad de mineral, con un volumen de la solución del colector en un rango de concentraciones entre 5-45 mg/L, durante el tiempo de equilibrio determinado en la cinética de adsorción. Al finalizar este tiempo, se retiraron las muestras y se cuantificó la cantidad de colector no adsorbido utilizando la técnica antes mencionada.

Los datos experimentales que se obtuvieron de las cinéticas e isotermas de adsorción se utilizaron para aplicar diferentes modelos matemáticos para determinar cuál describió mejor el proceso de adsorción del colector en la superficie del mineral.

### Discusión de resultados

Las micrografías (Figura 1 a-b) mostraron que el mineral tiene una superficie porosa, formada por la aglomeración de partículas, así mismo los bordes tienen una definición clara características de los minerales. Sin embargo, cuando el colector se adsorbió la morfología cambió haciéndose menos rugosa además se observó que los bordes perdieron definición corroborando la adsorción del colector sobre la superficie del mineral (Figura 1 c-d).

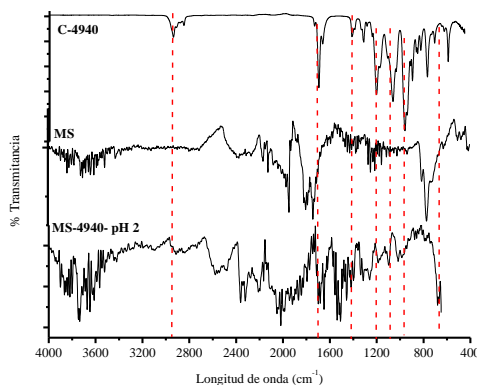


**Figura 1:** Micrografías de SEM del mineral antes (a y b) y después de la adsorción del colector (c y d).

El espectro IR del colector C-4940 presentó bandas características en la región de 2970-650  $\text{cm}^{-1}$ . Las bandas de 2963  $\text{cm}^{-1}$  correspondieron al grupo C-H, mientras que las bandas 1746 y 1264  $\text{cm}^{-1}$  correspondieron a los grupos C=O y C-O respectivamente, las bandas de 1126 y 665  $\text{cm}^{-1}$  pertenecieron a los grupos C=S y C-S, la banda de 2875  $\text{cm}^{-1}$  es del grupo  $\text{CH}_2\text{-O}$ , las bandas de 1470 y 1371  $\text{cm}^{-1}$  se atribuye al grupo  $\text{CH}_3$  asimétrico y  $\text{CH}_3$  simétrico, la banda de 778  $\text{cm}^{-1}$  es correspondiente a  $\text{-O-C=O}$ .

El espectro IR del mineral (Figura 2) mostró bandas a 800-1200  $\text{cm}^{-1}$  que correspondieron a las vibraciones del mineral (Karikalán et al., 2017). La banda a 2168  $\text{cm}^{-1}$  coincide con las señales del mineral reportadas por (Suja et al., 2013). Las bandas alrededor de 1974-2024  $\text{cm}^{-1}$  y superiores a 3000  $\text{cm}^{-1}$  están relacionadas con la absorción de agua (Frediksson, 2006).

Cuando se llevó a cabo el proceso de adsorción del C-4940, se observaron diferencias con respecto al espectro del mineral. Se observó la aparición de los picos característicos del colector que correspondieron a las bandas de 1738, 1222, 2963 y 1375  $\text{cm}^{-1}$ , correspondientes a los grupos funcionales C=O, C=S, C-H y  $\text{CH}_3$  simétrico respectivamente (Figura 2). Las bandas que sufrieron este desplazamiento son las relacionadas con los grupos O-C (= S), C = S y -O-C = O, pertenecientes al colector y mediante ellos se dio la interacción con el metal en la superficie del mineral. La señal que apareció en el espectro cerca de 610  $\text{cm}^{-1}$  (Mineral-C-4940-pH = 2) pudo atribuirse a la interacción Cu-O que implicó la unión entre el colector y la superficie de mineral.



**Figura 2:** Espectro FTIR de mineral: antes y después de tratamiento con C-4940.

El tiempo de equilibrio para el proceso de adsorción del colector, fue diferente para cada valor de pH (Tabla 1). La adsorción del C-4940 fue más corta a pH = 2 seguido de pH = 4, mientras que para pH=6 se requirió de más tiempo para la adsorción. En general, los tiempos de equilibrio obtenidos están de acuerdo con los tiempos de acondicionamiento para un proceso típico de flotación. (Bulatovic, 2007).

**Tabla 1:** Tiempo de equilibrio para la adsorción del colector C-4940 sobre mineral sintético

pH	t <sub>eq</sub> (min)
2	9
4	12
6	30

La adsorción aumentó desde el contacto inicial entre soluciones de mineral-colector, esto es muy importante cuando la flotación es la siguiente etapa en el proceso de recuperación de metal porque requiere un menor tiempo de contacto. El proceso de adsorción de C-4940 se favoreció a pH 2, pero la diferencia es pequeña a pH 6 que es el tiempo de contacto más largo. Por lo tanto, el colector C-4940 pudo usarse en un amplio rango de pH.

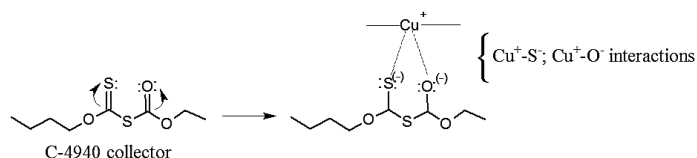
El principal objetivo de la investigación fue evaluar la efectividad del colector a pH ácido, por lo que se usaron los datos experimentales provenientes de pH=2. Los modelos no lineales de cinética de pseudo primer y pseudo de segundo orden (Berhane et al., 2017) se aplicaron a los datos experimentales para pH = 2 para la adsorción del colector C-4940 (Tabla 2).

**Tabla 2:** Parámetros cinéticos del modelo para la adsorción de C-4940 sobre mineral de covelita.

Parámetro	C-4940 q <sub>exp</sub> = 13.8037 mg/g
<b>Pseudo primer orden</b>	
q <sub>ecal</sub> (mg/g)	12.7043
k (min <sup>-1</sup> )	0.6153
R <sup>2</sup>	0.9820
RSS	2.5303
X <sup>2</sup>	0.3615
<b>Pseudo Segundo orden</b>	
q <sub>ecal</sub> (mg/g)	14.1283
k <sub>2</sub> (g/mg·min)	0.0979
R <sup>2</sup>	0.9951
RSS	0.6834
X <sup>2</sup>	0.0976

R<sup>2</sup>: Coeficiente de correlación; RSS: Suma de residuales cuadrados; X<sup>2</sup>: Chi cuadrado

El mejor ajuste para la adsorción de C-4940 fue con el modelo de pseudo segundo orden, por lo que la interacción fue a través del proceso de quimisorción. La información obtenida de los modelos cinéticos permitió proponer el mecanismo para la interacción covelita-colector (Figura 3). El mecanismo ilustrado en la Figura 3 estuvo de acuerdo con la información obtenida de los análisis de la adsorción de mineral sintético, con colector C-4940 en el mineral.



**Figura 3:** Mecanismo de interacción del mineral de covelita y el colector de xantógeno.

Cuando se obtuvieron las isotermas de adsorción, el mejor modelo para la adsorción de C-4940 fue el modelo de Freundlich, (Tabla 3). La adsorción se produjo en superficies heterogéneas. El valor de  $1/n$  para la adsorción (0.37) estaba entre 0 y 1 indicando procesos favorables. Por esta razón, la heterogeneidad fue mayor para C-4940. De la constante de Temkin (B) se obtuvieron un factor (b) relacionado con las interacciones adsorbente-adsorbato. La interacción de C-4940-covelita es de 313.53 (Saadi et al., 2015). La capacidad máxima de adsorción fue de 44.62 mg/g.

**Table 3:** Parámetros del modelo de isoterma para la adsorción de C-4940 en mineral de covelita.

Parámetro	C-4940
$q_{max}$ (mg/g)	44.62
$K_L$ (L/g)	0.26
$R^2$	0.9183
$K_F$ (mg/g)/(mg/L) <sup>n</sup>	12.01
$1/n$	0.37
$R^2$	0.9587
$q_{max}$ (mg/g)	333.32
$K_{LF}$ (L/g)	0.04
$1/n$	2.51
$R^2$	0.9551
A (L/g)	4.91
B (J/mol)	7.90
$R^2$	0.9363
$K_r$ (L/g)	71.64
$a_r$ (L/mg)	5.04
$b_r$	0.68
$R^2$	0.9566
$q_{max}$ (mg/g)	34.17
B (mol <sup>2</sup> /J <sup>2</sup> )	$4.61 \cdot 10^{-7}$
E(kJ/mol)	1.04
$R^2$	0.7494

### Conclusiones

El colector de xantógeno C-4940 puede usarse como colector para la recuperación de cobre en el proceso de flotación. El tiempo de equilibrio para cada proceso de adsorción fue diferente. El proceso de adsorción C-4940 se favoreció a pH 2 pero la diferencia es pequeña a pH 6 para el tiempo de contacto más largo. El colector C-4940 se puede utilizar como colector en un amplio rango de pH.

La adsorción de C-4940 se ajustó mejor con el modelo de pseudo segundo orden. La interacción fue a través del proceso de quimisorción. El mejor modelo de adsorción isotérmica para el proceso C-4940 fue el modelo de Freundlich. Para el proceso C-4940 implica que la adsorción ocurre en superficies heterogéneas. La capacidad máxima de adsorción fue de 44.62 mg/g para C-4940. El compuesto orgánico

es un potencial colector para la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados en un proceso de flotación.

### Bibliografía

Ackerman, P. K., Harris, G. H., Klimpel, R. R., & Aplan, F. F. (2000). Use of xanthogen formates as collectors in the flotation of copper sulfides and pyrite. *International journal of mineral processing*, 58(1-4), 1-13.

Berhane, T. M., Levy, J., Krekeler, M. P., & Danielson, N. D. (2017). Kinetic sorption of contaminants of emerging concern by a palygorskite-montmorillonite filter medium. *Chemosphere*, 176, 231-242.

Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores*. Elsevier.

Fredriksson, A. (2006). Kinetics of collector in-situ adsorption on metal sulphide surfaces studied by ATR-FTIR spectroscopy (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).

Karikalan, N., Karthik, R., Chen, S. M., Karuppiah, C., & Elangovan, A. (2017). Sonochemical Synthesis of Sulfur Doped Reduced Graphene Oxide Supported CuS Nanoparticles for the Non-Enzymatic Glucose Sensor Applications. *Scientific Reports*, 7(1), 2494.

Moudgil, B. M., Soto, H., & Somasundaran, P. (1988). Adsorption of surfactants on minerals. Marcel Dekker, Inc., *Reagents in Mineral Technology*, 79-104.

Saadi, R., Saadi, Z., Fazaeli, R., & Fard, N. E. (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(5), 787-799.

Suja, R., Geetha, D., & Ramesh, P. (2013). Preparation and characterization of CuS nanomaterials by solvothermal method. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 4(3), 1-3.



SOCIEDAD QUÍMICA  
DE MÉXICO, A.C.  
*“La química nos une”*



## Efecto del medio en la digestión ácida asistida por microondas de minerales para la cuantificación de Au

Remedios Cisneros Magaña<sup>1</sup>, Diana Cholico González <sup>2</sup>, Fabiola Nava Alonso<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N. Edif. "U" Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México 58030 [reme\\_cisneros@hotmail.com](mailto:reme_cisneros@hotmail.com)

<sup>2</sup> CONACYT- Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N. Edif. "U" Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán, México 58030 [dcholico@umich.mx](mailto:dcholico@umich.mx)

<sup>3</sup>CINVESTAV Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica 1062 Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe. Ramos Arizpe, Coahuila. 25900 [fabiola.nava@cinvestav.edu.mx](mailto:fabiola.nava@cinvestav.edu.mx)

## Resumen

El análisis de muestras minerales puede representar un gran reto debido a que para ello deben disolverse completamente en medios ácidos. Para este trabajo se han empleado muestras de minerales auríferos del estado de Sonora, que han sido procesadas por digestión ácida asistida por microondas en diferentes medios. Los resultados de la caracterización muestran la presencia de cuarzo y otras especies de la familia de los silicatos. La digestión completa de las muestras fue lograda usando agua regia (HCl y HNO<sub>3</sub>) con la adición de 2 mL de HF, con lo cual se destruyó la matriz de silicatos y permitió una cuantificación máxima de Au del orden de 109.9 g/ton. El tamaño de partícula mostró tener poco efecto en la cantidad de Au cuantificada para las muestras evaluadas.

**Palabras Clave:** *Minerales auríferos, digestión ácida, oro.*

## Introducción

El análisis químico de minerales auríferos por técnicas como absorción atómica de flama, es una ardua tarea debido a que de ello depende la cuantificación de la(s) especie(s) de valor siendo los de mayor interés el Au y la Ag por el valor comercial que representan. Para la cuantificación de estos elementos en un mineral, el tratamiento convencional para su medición incluye una digestión ácida, seguida de una cuantificación principalmente por absorción atómica de flama <sup>1-2</sup>. Sin embargo, las especies de Au asociadas a otros elementos impiden una digestión completa de la muestra. La presencia de elementos como telurio afecta la cuantificación de Au debido a que la reactividad de sus especies con metales preciosos presenta un comportamiento refractario <sup>3</sup> y por tanto, solo se realiza una cuantificación parcial. En México, se han reportado especies de oro y plata asociadas al telurio en el estado de Sonora como calaverita (AuTe<sub>2</sub>), hessita (Ag<sub>2</sub>Te), silvanita ((AgAu)<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>) y petzita (Ag<sub>3</sub>AuTe) entre otras <sup>4</sup>. El análisis de este tipo de minerales no es una tarea trivial y tener una opción de tratamiento es algo que merece ser evaluado, ya que el interés de estos minerales radica además del contenido de metales preciosos, en el telurio que por sus aplicaciones electrónicas ha incrementado su demanda en los últimos años. En el tratamiento de muestras minerales, previo a su cuantificación se ha propuesto el uso de microondas para lograr una digestión en menor tiempo en comparación a una digestión abierta <sup>5</sup>, ya que se incrementa la velocidad de reacción. Por lo que en este trabajo se propone un tratamiento de digestión ácida asistida por microondas para la disolución de muestras minerales que permitan una cuantificación de Au en presencia de elementos como Te.

## Materiales y métodos

Todos los reactivos empleados en este trabajo fueron de grado analítico y empleados sin purificación previa. El mineral evaluado en esta investigación corresponde a un mineral aurífero obtenido en el estado de Sonora, México que fue caracterizado en un difractor de Rayos X D5000 (Siemens) utilizando radiación Cu-K $\alpha$  en el rango 2 $\theta$  de 5 a 80°. Las muestras minerales con diferentes tamaños fueron usadas como se recibieron. El tamaño de partícula fue evaluado en un granulómetro láser LS100Q (Coulter). Todas las muestras fueron secadas en una mufla por 2 horas a 80 °C antes de su uso. Se pesó una cantidad de 0.25 g base seca de cada muestra en una balanza analítica AB135-S (Metler-Toledo) con una precisión de  $\pm$  0.1 mg. Para la disolución de las muestras minerales, fue empleado un horno de microondas de 16 posiciones modelo Titan MPS (Perkin Elmer). Las muestras pesadas fueron colocadas en los vasos de digestión de 75 mL cada uno y posteriormente fueron adicionados los ácidos minerales concentrados en forma de agua regia (9 mL HCl+ 3 mL HNO<sub>3</sub>, J.T. Baker y Química Meyer) o bien agua regia en combinación con HF (Merk) según fue requerido (1.5 o 2 mL). Finalmente, los vasos fueron cerrados y colocados dentro del digester. Una vez completado el método de digestión, los vasos se colocaron en una campana de extracción para su enfriamiento y finalmente verter las muestras digeridas en matraces aforados y completar el volumen a 25 mL con agua desionizada para su posterior análisis. En el caso de las muestras a las que fue adicionado HF, se les realizó un procedimiento de neutralización por la adición de 12 mL de una solución saturada de boratos (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, Merk) para finalmente ser ingresadas nuevamente al horno de microondas para su completa reacción. Las muestras digeridas fueron analizadas por espectrofotometría de absorción atómica de flama en un equipo 3100 (Perkin-Elmer) para la cuantificación de Au. En base al resultado obtenido de la cuantificación fue calculado el contenido de Au en las muestras minerales expresado en g/ton considerando la masa de muestra.

### Discusión de resultados

En la Figura 1, se presenta la caracterización por difracción de rayos X de la muestra obtenida del estado de Sonora así como la distribución de tamaño de partícula de las cuatro diferentes muestras que fueron analizadas en este trabajo.

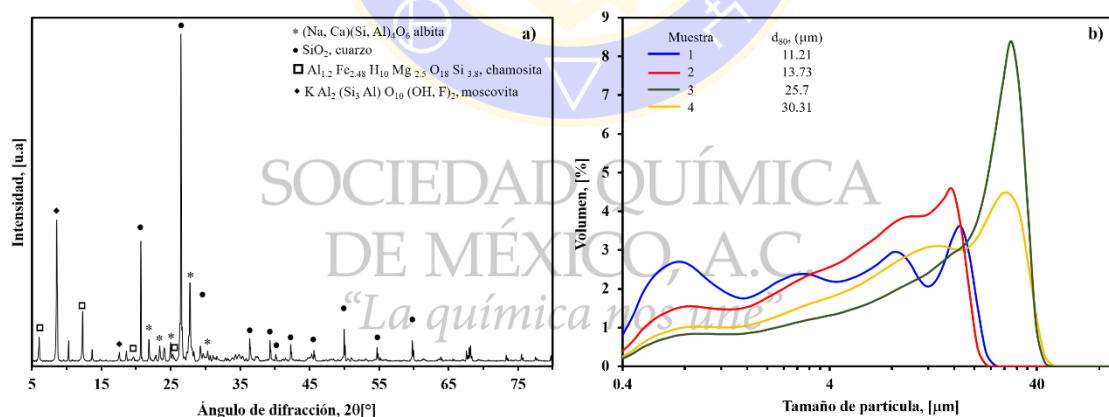


Figura 1 a) Patrón de difracción de rayos X de la muestra mineral obtenida del Estado de Sonora y b) distribución de tamaño de partícula de las cuatro muestras.

En la Figura 1a se puede notar que las señales principales encontradas, corresponden a SiO<sub>2</sub>, cuarzo; además de otras especies como (Na, Ca)(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>6</sub> albite; Al<sub>1.2</sub>Fe<sub>2.48</sub>H<sub>10</sub>Mg<sub>2.5</sub>O<sub>18</sub>Si<sub>3.8</sub> chamosita y KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH, F)<sub>2</sub> moscovita. Todas estas especies se encuentran asociadas a silicio. No se observaron picos atribuidos a oro libre o asociado a Te, debido a que la cantidad presente de este tipo de especies se encuentra por debajo de la sensibilidad del equipo. En la Figura 1b se observa la distribución del tamaño de partícula de las muestras de mineral, mostrando un amplio rango de tamaños entre 0.4 y 50  $\mu$ m y con distribuciones multimodales. Las muestras 1 y 2 presentan menor tamaño de partícula con un d<sub>80</sub> de 11.21 y 13.73  $\mu$ m mientras que para la 4 y 5, este valor es de 25.7 y 30.31  $\mu$ m respectivamente.



Las muestras 1 y 2 del mineral, fueron digeridas primeramente usando agua regia, AR (HCl+HNO<sub>3</sub>). En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos para la cuantificación de Au empleando este medio de digestión.

Tabla 1. Cuantificación de Au en muestras minerales usando agua regia (AR) como medio digestión.

Muestra	d <sub>80</sub> , (µm)	[Au](g/Ton)
1	11.21	13.3
2	13.73	13.4

Como se puede apreciar la cantidad de Au registrada es muy similar entre las muestras con valores de 13.3 y 13.4 g/ton. Es importante mencionar que parte de la muestra no se logró disolver por completo permaneciendo un residuo sólido, mostrando que el agua regia no es suficientemente reactiva para la digestión completa. Por lo que la cantidad registrada de Au, solo corresponde al oro en forma libre.

Se ha reportado, que los telururos de metales preciosos de la región de Sonora, se encuentran como macro y micro inclusiones en silicatos <sup>4</sup>, lo que es confirmado con la caracterización por difracción de rayos X mostrada anteriormente. De acuerdo a Balcerzak <sup>1</sup>, el uso de HF en el medio de digestión favorece la disolución de silicatos presentes en muestras minerales. Por lo que fue agregado HF en dos proporciones para las siguientes digestiones realizadas.

Los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 2, donde es posible apreciar que para todas las muestras digeridas en presencia de HF (1.5 mL), la cantidad de Au por tonelada de mineral se ve incrementada de manera importante en comparación con los resultados obtenidos con AR (Tabla 1). Para todas las muestras, se obtuvieron valores superiores a 90 g/ton. Al incrementar a 2 mL el HF, se observó un aumento en la concentración de Au obtenida. No obstante, la digestión completa de las muestras fue observada sólo cuando fueron agregados 2 mL de HF durante la digestión. Para esta condición, la concentración de Au obtenida fue de 104.9 y 109.9 g/ton para la muestra 1 y 2, respectivamente. El efecto del HF se encuentra relacionado con la matriz de la muestra, ya que como se mostró en la caracterización, es rica en cuarzo (SiO<sub>2</sub>), siendo indispensable el uso de este ácido para la digestión completa. Este resultado, permite constatar que gran parte del Au presente en la muestra se encuentra como microinclusiones en una matriz de silicatos, de tal modo que, al disolver el cuarzo presente en el mineral, todo el Au queda liberado y es posible disolverlo para la acción del agua regia.

Tabla 2. Cuantificación de Au en muestras minerales usando diferentes medios de digestión.

Muestra	d <sub>80</sub> , (µm)	AR+1.5mL HF	AR+2mL HF
		[Au] (g/Ton)	[Au] (g/Ton)
1	11.21	93.9	104.9
2	13.73	99.8	109.9
3	25.7	105.1	109.5
4	30.31	91.5	93.5

En la Tabla 2, se presenta además la cuantificación de Au para muestras con diferente tamaño de partícula (d<sub>80</sub>). Se observa que, al disminuir el tamaño de las partículas de las muestras minerales, se tiene solo un

ligero incremento en la cantidad de Au cuantificada, siendo el valor a 109 g/ton. Wang y col.<sup>6</sup> mostraron que para que la digestión de minerales auríferos con agua regia sea eficiente, el tamaño de partícula empleado deberá ser inferior a 200  $\mu\text{m}$  con la finalidad de evitar el efecto “nugget” que se refiere a las partículas de Au encapsuladas en una matriz mineral. Sin embargo, el tamaño de partículas empleado en este trabajo es mucho menor y como se ha mostrado en los resultados, el agua regia no es un medio apropiado para la digestión de la muestra. Este fenómeno puede estar relacionado con las especies de Au asociadas a Te presentes en las muestras minerales y que requieren de mayor investigación.

### Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo ha permitido evaluar un método de preparación de muestras minerales por medio de la digestión ácida asistida por microondas. Esta alternativa incluye una combinación de HCl, HNO<sub>3</sub> y HF para lograr la digestión completa de la muestra y así cuantificar el Au presente en la muestra. El resultado del análisis de las muestras indica que la concentración de Au se incrementa con la cantidad de HF empleado en la digestión logrando un máximo de 109.9 g/ton, lo cual representa una buena riqueza del mineral para su explotación. El Au contenido en la muestra puede encontrarse como microinclusiones en una matriz de silicatos, de tal modo que, al disolver la matriz del mineral, todo el Au queda liberado y es posible disolverlo por acción del agua regia y HF.

### Agradecimientos

Los autores desean extender un agradecimiento al Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo de investigación.

### Bibliografía

1. Balcerzak, M., Sample Digestion Methods for the Determination of Traces of Precious Metals by Spectrometric Techniques. *Analytical Sciences* **2002**,18 (7), 737-750.
2. S. Reddi, G.; R. M. Rao, C., Analytical techniques for the determination of precious metals in geological and related materials. *Analyst* **1999**,124 (11), 1531-1540.
3. Ellis, S.; Deschênes, G., Chapter 51 - Treatment of Gold-Telluride Ores A2 - Adams, Mike D. In *Gold Ore Processing (Second Edition)*, Elsevier: 2016; pp 919-926.
4. Aguayo, S.; Pérez, E.; Encinas, M. A., Recursos y alternativas de tratamiento para los minerales de teluro de Sonora (México). *Revista de Metalurgia* **1996**,32 (1), 7.
5. Haque, K. E., Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review. *International Journal of Mineral Processing* **1999**,57 (1), 1-24.
6. Wang, Y.; Baker, L. A.; Brindle, I. D., Determination of gold and silver in geological samples by focused infrared digestion: A re-investigation of aqua regia digestion. *Talanta* **2016**,148, 419-426.