

Extracción de Au en un sistema halógeno-halogenuro (I₂-I⁻)

J.G. Moreno-Cedillos ^{1,*}, F.R. Carillo-Pedroza ¹, M.J. Soria-Aguilar ¹

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carretera 57, km 5, C. P.
25710, Monclova, Coahuila, México.

* josemorenocedillos@uadec.edu.mx

RESUMEN

La obtención de oro en rocas minerales es posible por el método hidrometalúrgico llamado lixiviación. Desde hace más de un siglo la técnica de lixiviación más usada ha sido la cianuración, debido a su amplia tasa de efectividad y proceso altamente rentable, pero, las malas prácticas operacionales, el largo tiempo de recuperación, y la mineralogía cada vez más compleja, exigen el estudio de diferentes sistemas lixiviantes alternos. En la actualidad es bien sabido que sistemas que involucren halógenos, se catalogan como buenos lixiviantes, por esa razón la técnica de yoduración es una técnica atractiva, ya que no se ha estandarizado. Entre las ventajas del uso de este agente lixiviante se propone la reducción de riesgos por malas prácticas, una selectividad específica para metales preciosos de interés y una tasa de recuperación competitiva frente a la cianuración. En este estudio se realizó el análisis estadístico de 16 pruebas de yoduración, las cuales fueron determinadas con pruebas físicas, químicas y analíticas, utilizando un mineral de una industria minera el cual es asociado a óxidos de hierro. El tamaño de partícula usado en el análisis es de 180 μm , obtenido tras un proceso de cuarteo, homogenizado y tamizado por Ro-tap, las pruebas se realizaron con las siguientes variables tiempo (20-80 min), temperatura (5-60 °C) y concentración (25-100%). Las variables constantes de las pruebas realizadas fueron pH (6-8), agitación (900 rpm) y volumen (200 mL). Los análisis de los licores obtenidos se llevaron mediante la técnica de ICP (plasma de acoplamiento inductivo).

PALABRAS CLAVE: *hidrometalurgia; lixiviación; cianuración; mineralogía; yodo*

ANTECEDENTES

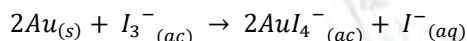
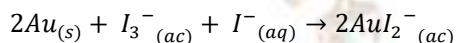
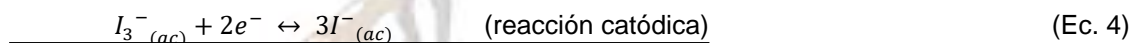
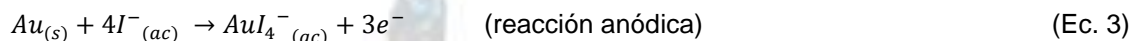
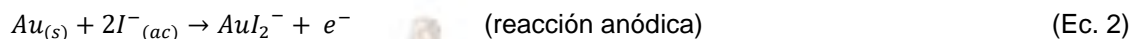
A nivel mundial México es reconocido por ser un país minero, contando con actividad de extracción minera en cada estado del país, actualmente el octavo productor de oro y el primero de plata en todo el mundo [1]. Los metales preciosos como el oro, han sido de interés para los humanos durante miles de años[2], una de las razones son las características físicas que presentan, pero en la actualidad este metal ha generado e intensificado la demanda debido a que es utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos[3]. La ley de oro en diferentes yacimientos ha comenzado a caer, debió a que cada vez es más complicado encontrar oro nativo y se encuentra acompañados de óxidos de hierro o sulfuros, lo cual incrementa el grado de dificultad de extracción [4], además en los últimos dos años se ha visto un retroceso económico en la producción debido a factores externos[5], siguiendo la hidrometalurgia del oro, la técnica utilizada es la cianuración, la cual a nivel industrial ya se encuentra estandarizada debido a sus más de 100 años de aplicación en diferentes tipos de menas, desde las que son fáciles estratégicamente de tratar hasta las que presentan una mayor dificultad[6], si bien el uso del cianuro es una técnica que representa ventajas como su bajo costo, tiene consigo repercusiones que no deben pasar por alto, como lo son los efectos medioambientales negativos propiciados por las malas prácticas operacionales, los tiempo tardíos de recuperación y efectos citotóxicos en operadores[7], la generación de conocimientos sobre nuevas técnicas para la recuperación de oro en solución acuosa es indispensable. De los incontables métodos para extraer metales preciosos como el oro, el uso de un sistema halógeno-halogenuro (yodo-yoduro), han mostrado ser buenos lixiviantes, sobre todo selectivos para oro y plata con un buen porcentaje de recuperación[8]. La yoduración a pesar de ser una metodología conocida, aún no está estandarizada, debido a que la mayoría de sus aplicaciones se encuentran en la recolección de oro en chatarra electrónica[9], no obstante fenómenos como temperatura, agitación, tiempo y concentración son indispensables para la elaboración de un modelo estadístico, el cual permita conocer las mejores condiciones de reacción para llevar a cabo una eficiente extracción, tomando en cuenta la relación costo-beneficio.

Química de la disolución de oro en una solución con yodo. La disolución del oro en una solución de yodo-yoduro se define como una reacción de óxido-reducción (rédox), y la manera de representarse es en una celda electroquímica, en la cual interactúan 2 tipos de reacciones químicas (catódicas y anódicas). Este proceso inicia con la formación del ion I₃⁻ cómo se representa en la siguiente ecuación [10] .



La formación del ion I₃⁻ aumentará la solubilidad del I₂ a nivel molecular en la solución acuosa, a medida que el ion I⁻ incrementa en su concentración.

Las reacciones electroquímicas propuestas a continuación muestran el I₃⁻ como un agente oxidante.



La formación del complejo entre yodo y oro (AuI_2^-) se muestra en la figura 1, en donde es posible observar que la condición para que se forme en un medio acuoso será posible en un rango amplio de pH que va desde 1 hasta 9, y en medios completamente bajos se puede empezar a dificultar su formación, siguiendo estos conceptos de formación es posible decir que no se necesita de una concentración elevada del ion I_3^- para que se lleven a cabo las reacciones anódicas y la reacción catódica planteada anteriormente.

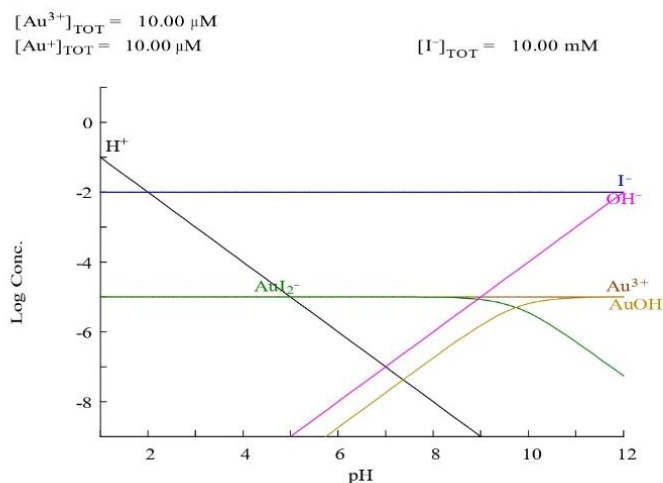


Figura 1.- Diagrama de formación (AuI_2^-) en presencia de yodo-yoduro.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Preparación de muestras

El mineral utilizado durante la realización de este proyecto es procedente de la industria minera y está asociado a óxidos de hierro, se tiene como datos que presenta una ley de 52 g/Ton de Au

Diseño de experimentos

Se realizaron experimentos siguiendo el diseño de experimentos Taguchi L16 con arreglo (4³), para conocer el análisis estadístico de la extracción. Estas pruebas se basaron en la metodología de Meng y colaboradores (2019) con ciertas diferencias en las técnicas como se muestra en la tabla 1. En esta metodología se incluyeron cuatro rangos de tiempo (20-80 min), cuatro temperaturas diferentes (5-60°C) y cuatro concentraciones (25-100%), todos los experimentos se realizaron en un sistema acuoso de 200 mL, agitación de 1200 rpm, un peso de mineral de 50 g y un tamaño de partícula de 180 µm.

Tabla 1.- Condiciones experimentales del diseño Taguchi L16.

Temperatura (°C)	Concentración (%)	Tiempo (min)
5	25	80
5	50	60
5	75	40
5	100	20
20	25	20
20	50	40
20	75	60
20	100	80
40	25	40
40	50	20
40	75	80
40	100	60
60	25	60
60	50	80
60	75	20
60	100	40

El proceso de recuperación se llevó a cabo en vasos de precipitado de 400 mL y la muestra requerida para cada prueba fue de 50 g, previamente seca, molida y tamizada.

La solución se mantuvo a 1200 r.p.m. con agitación magnética, durante el proceso de lixiviación en medio yodo-yoduro el valor registrado fue de pH 6. La solución resultante se filtró recuperando la muestra sólida y líquida, para su posterior cuantificación y caracterización.

Espectroscopía de Plasma ICP-OES

La técnica de espectroscopía de Plasma (ICP-OES) sirvió para la determinación de Au presente en las muestras en cada sistema lixivante, la presencia de Au fue posible en todas las muestras analizadas, cabe destacar que esta técnica se empleó para conocer cuánto Au se recuperó y, de esta manera identificar el efecto de cada variable, para este análisis se utilizó el equipo de espectroscopía de Plasma (ICP-OES) Optima 8300 con los parámetros de soluciones estándar de ppm para determinación Au.

Los concentrados obtenidos en la etapa de flotación de Pb presentan: bajo grado, alto peso de concentrado y baja recuperación se decide bajar la dosificación de del colector para mejorar el grado, sin resultados, continua el comportamiento de alto peso en los concentrados aun sin adición de colector; la investigación se centró en entender este comportamiento, denominado como “flotabilidad natural”.

RESULTADOS

Los datos obtenidos mediante la técnica de espectroscopia se agruparon en la Tabla 2 donde se muestran los promedios de las interacciones de las diferentes variables de respuesta, temperatura, tiempo y concentración.

Tabla 2.- Media de cada factor en mg/L de Au.

Nivel	Temperatura	Concentración	Tiempo
1	0.2769	3.9433	3.1668
2	10.9409	4.4532	4.9129
3	10.0093	6.8561	7.2769
4	1.2740	7.2485	7.1444

Con base en los resultados es posible realizar la gráfica que se muestra en la figura 2. En donde es posible observar los efectos de la temperatura de acuerdo a los datos recabados de la experimentación.

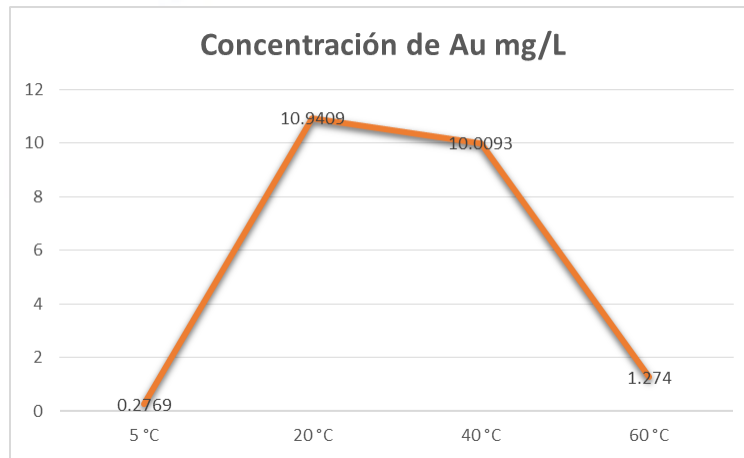


Figura 2.- Efecto de la temperatura en la disolución de Au.

Para observar la recuperación de Au en la concentración es posible visualizarlo en la figura 3.

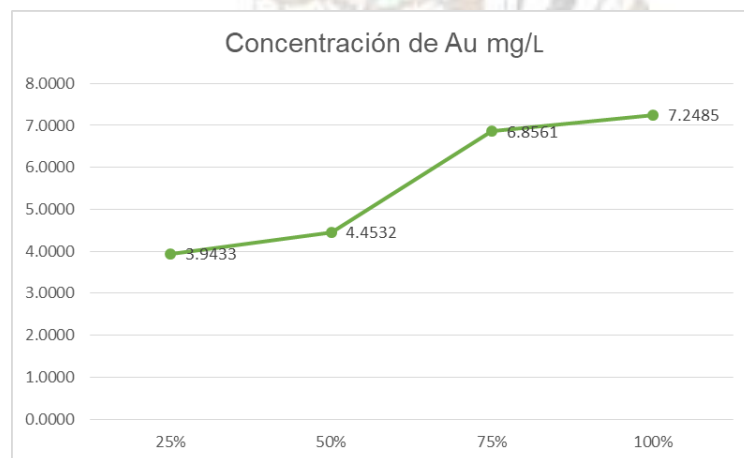


Figura 3.- Efecto de la concentración en la disolución de Au.

En la figura 4 se puede ver la recuperación de Au en base al efecto generado por el tiempo.

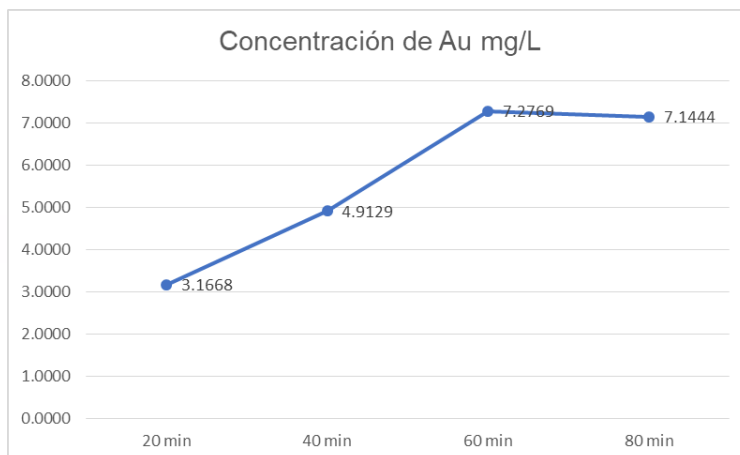


Figura 4.- Efecto del tiempo en la disolución de Au.

DISCUSION

Los datos obtenidos se obtuvieron mediante espectroscopía de Plasma solamente, y reflejan la disolución de oro en un sistema lixivante que contiene yodo en presencia de yoduro. De acuerdo a la tabla 2 la variable que más afecta para obtener una mejor disolución de Au es la temperatura, siendo 20 °C [11], concuerda con lo que afirma Shimin Yu y colaboradores, en la que los rangos de temperatura a escala industrial varían de entre 20°-30°C y son considerados como óptimos. Es posible observar como a una temperatura baja (5°C) y temperaturas altas (> 40 °C) la concentración es baja o comienza a disminuir, este fenómeno obedece al principio de la formación del ion I_3^- [12] como lo menciona Naorem que ya se ha determinado espectrofotométricamente la constante de formación de iones triyoduro a partir del equilibrio yodo-yoduro en medios mixtos acuoso, orgánico o polimérico y oscila entre los 20-40°C.

La concentración también tiene un efecto sumamente importante al hablar de extracción de Au, en este caso se puede determinar que a mayor concentración de yodo-yoduro existe una relación que cumple con el principio de aumentar su extracción de oro, debido a que le será más fácil la formación del ion (AuI_2^-), este fenómeno ya ha sido estudiado por Wang [13], en donde puede deducirse que a mayor concentración de yoduro mayor será el porcentaje de extracción.

En el último de los efectos tenemos el tiempo en el que se ha llevado a cabo cada experimento teniendo un incremento en la extracción a medida que aumenta el tiempo, siendo 60 minutos el mejor resultado y 80 minutos presentando un pequeño descenso en la extracción, este comportamiento también lo observó Altansukh y colaboradores [14], en donde se reproduce un efecto coordinado debido a la concentración del medio lixivante, se reveló que una mayor concentración de yodo puede promover la eficiencia de la disolución del oro en la solución de yodo-yoduro, en contraste con este fenómeno, el exceso de yodo

(especies de yodo/yoduro) en la solución preñada tiene un efecto negativo en la adsorción de oro al pasar más tiempo en contacto.

CONCLUSIONES

La lixiviación de Au por la técnica de yoduración aún se encuentra lejos de la estandarización para aplicarse a procesos industriales, debido a que hacen falta diferentes análisis cinéticos y estadísticos que permitan conocer el comportamiento ante diferentes leyes de minerales.

Durante la realización de este proyecto se analizaron tres variables de respuesta siendo la temperatura la que toma un peso más importante al momento en la disolución de Au, por otra parte es posible identificar que tanto la concentración del medio lixivante como el tiempo de lixiviación forman un efecto sinérgico que permite que la solución aumente o disminuya su disolución, se habla de un efecto en conjunto debido a que si uno baja o aumenta los valores significaría disminución en los porcentajes de disolución.

Experimentalmente fue posible obtener una concentración real de 14.25 mg/L de solución y 13.60 mg /L de contenido de Au, para el primer caso se aplicó una temperatura de 40 °C con un 100% solución yodo-yoduro en un tiempo de 60 minutos y para el segundo caso una temperatura de 20°C con una concentración de 75% de solución yodo-yoduro en un tiempo de 80 minutos, en base a estos resultados es posible visualizar el efecto significativo de las variables estudiadas además de la interacción entre sí.

Mediante los datos obtenidos es posible identificar que aún se tienen que realizar un análisis científico para identificar las mejores condiciones de reacción y así hacer una comparativa costo beneficio en relación a las técnicas de cianuración.

REFERENCIAS

- [1] F. Nava, "Retos actuales en la extracción de metales preciosos en México," *Universitarios Potosinos*, San Luis Potosi, pp. 22–25, Jan. 2018.
- [2] BDO, "Perspectivas a futuro sobre el mercado del oro," in *03/09*, 2020, p. 46, [Online]. Available: <https://www.bdo.es/es-es/publicaciones/publicaciones-tecnicas/internacional/mercado-del-oro-crisis-coronavirus>.
- [3] M. A. Dehchenari, S. Hosseinpoor, R. Aali, N. Salighehdar Iran, and M. Mehdipour, "Simple method for extracting gold from electrical and electronic wastes using hydrometallurgical process," *Environ. Heal. Eng. Manag.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–58, 2016, doi: 10.15171/ehem.2017.08.
- [4] D. Medina and C. G. Anderson, "A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–11, 2020, doi: 10.3390/met10070897.

- [5] F. Donoso and J. Cantallopts, "Informe del mercado del oro," 2021.
- [6] B. Altansukh, K. Haga, H. H. Huang, and A. Shibayama, "Gold recovery from waste printed circuit boards by advanced hydrometallurgical processing," *Mater. Trans.*, vol. 60, no. 2, pp. 287–296, 2019, doi: 10.2320/matertrans.M2018328.
- [7] F. Isaia *et al.*, "Gold and palladium oxidation/complexation in water by a thioamide-iodine leaching system," *Green Chem. MORENO/Downloads/fu2019.pdf*, vol. 19, no. 19, pp. 4591–4599, 2017, doi: 10.1039/c7gc01310h.
- [8] A. Karrech, M. Attar, E. A. Oraby, J. J. Eksteen, M. Elchalakani, and A. C. Seibi, "Modelling of multicomponent reactive transport in finite columns — Application to gold recovery using iodide ligands," *Hydrometallurgy*, vol. 178, pp. 43–53, 2018, doi: 10.1016/j.hydromet.2018.03.020.
- [9] C. J. Liang and J. Y. Li, "Recovery of gold in iodine-iodide system—a review," *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, vol. 54, no. 6. Taylor and Francis Inc., pp. 1055–1066, Apr. 13, 2019, doi: 10.1080/01496395.2018.1523931.
- [10] A. Davis, T. Tran, and D. R. Young, "Solution chemistry of iodide leaching of gold," *Hydrometallurgy*, vol. 32, no. 2, pp. 143–159, 1993, doi: 10.1016/0304-386X(93)90020-E.
- [11] S. Yu *et al.*, "Ultrasound-assisted cyanide extraction of gold from gold concentrate at low temperature," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 64, no. October 2019, p. 105039, 2020, doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105039.
- [12] H. Naorem and S. D. Devi, "Spectrophotometric determination of the formation constant of triiodide ions in aqueous-organic solvent or polymer mixed media both in absence and presence of a surfactant," *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 101, pp. 67–73, 2013, doi: 10.1016/j.saa.2012.09.058.
- [13] Q. Wang *et al.*, "Eco-friendly and economical extraction of gold from a refractory gold ore in iodide solution using persulfate as the oxidant," *Hydrometallurgy*, vol. 198, no. October, p. 105502, 2020, doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105502.
- [14] B. Altansukh, K. Haga, N. Ariunbolor, S. Kawamura, and A. Shibayama, "Leaching and adsorption of gold from waste printed circuit boards using iodine-iodide solution and activated carbon," *Eng. J.*, vol. 20, no. 4, pp. 29–40, Aug. 2016, doi: 10.4186/ej.2016.20.4.29