



EPISTEMUS: Ciencia, Tecnología y Salud

ISSN: 2007-8196

Universidad de Sonora

Robles-Ramos, R.; Reyna-Robelo, M. J.; Calla-Choque, D.; Santos-Jallath, J.S.  
Modelamiento y simulación de una planta de recuperación de plata con tiourea  
EPISTEMUS: Ciencia, Tecnología y Salud, vol. 16, núm. 32, 06, 2022, Enero-Junio  
Universidad de Sonora

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.210>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=726276431006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

## Modelamiento y simulación de una planta de recuperación de plata con tiourea

R. ROBLES-RAMOS<sup>1</sup>, M. J. REYNA-ROBELO<sup>2</sup>, D. CALLA-CHOQUE<sup>3\*</sup>, J.S. SANTOS-JALLATH<sup>4</sup>

### RESUMEN

***Algunos residuos generados en operaciones metalúrgicas tienen elementos metálicos de interés, por lo que pueden ser reprocesados para darle un valor adicional a la operación. Este trabajo presenta el modelamiento y simulación de tanques de lixiviación para la recuperación de plata con tiourea y oxalato a partir de jarositas que son uno de los principales desechos del procesamiento del zinc. Se usaron modelos de primer orden y se seleccionó el de mejor ajuste para la evaluación de la velocidad de lixiviación en tanques con agitación continua (CSTR). Finalmente se presentan los resultados obtenidos en la simulación del proceso con ayuda del software Matlab-Simulink® por medio de bloques de subsistemas.***

***Palabras clave:*** Modelamiento, simulación, plata, tanques de lixiviación

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, [ruben.robles@ingenieria.unam.edu](mailto:ruben.robles@ingenieria.unam.edu)

<sup>2</sup>Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, [mauricio67@comunidad.unam.mx](mailto:mauricio67@comunidad.unam.mx)

<sup>3</sup>Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, [dcalla@unam.mx](mailto:dcalla@unam.mx), <https://orcid.org/0000-0003-2848-4388>

<sup>4</sup>Doctor en Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, [jesantos@unam.mx](mailto:jesantos@unam.mx)

**Autor de Correspondencia:** Dandy Calla Choque, [dcalla@unam.mx](mailto:dcalla@unam.mx)

**Recibido:** 02 / 11 / 2021

**Aceptado:** 25 / 03 / 2022

**Publicado:** 29 / 04 / 2022

**Cómo citar este artículo:**

Robles Ramos, R., Reyna Robledo, M. J., Calla Choque, D., & Santos Jallath, J. E. (2022). MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE PLATA CON TIOUREA. EPISTEMUS, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.210>

## Modeling and Simulation of a Silver Recovery Plant with Thiourea

### ABSTRACT

*Some metallurgical wastes have residual metals of interest generated in metallurgical operations have values of interest that can be reprocessed to give additional value to the operation, this work presents the modeling and simulation of leaching tanks for silver recovery with thiourea and oxalate from jarosite that is principal zinc processing waste for this purpose first-order models were used and the one with the best fit was selected for the evaluation of the leaching rate in tanks with continuous stirring (CSTR). Finally, the results obtained with the process simulation are presented with the help of the Matlab-Simulink® software using subsystem blocks.*

**Key words:** Modeling, simulation, silver, leach tanks

## Introducción

Las jarositas son de interés en la industria metalurgia del zinc porque su formación facilita la eliminación de hierro en las soluciones de lixiviación, mientras genera un residuo estable y fácilmente removible del sistema [1]. Además, puede eliminar algunos otros elementos como el plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), plata (Ag) entre otros.

La jarosita con contenido de Ag, usada en este artículo es también llamada argentojarosita o jarosita de Ag, su contenido de plata resulta atractiva por el incremento de los precios de los metales; por lo cual se estudia una alternativa para la recuperación de metales valiosos [2].

### Tiourea

La tiourea ha sido propuesta como una alternativa para el tratamiento de minerales complicados en la recuperación de metales como, los sulfurosos, minerales que consumen cianuro (cianicidas) y para lugares donde las preocupaciones ambientales hacen que el uso del cianuro sea restringido. La tiourea es un reactivo relativamente no tóxico, que se comporta como fertilizante para algunas plantas, y podría ser una alternativa atractiva al cianuro en ambientes sensibles.

Por otra parte, se sospecha que es cancerígeno y es capaz de disolver metales pesados, además del Au y Ag, presenta algunos problemas ambientales similares al cianuro en el manejo y disposición de efluentes, sin embargo, su descomposición y tratamiento de las soluciones con tiourea es mucho más sencilla por métodos químicos [2].

### Modelos cinéticos

Los modelos matemáticos son un instrumento muy común en el estudio de sistemas de toda índole. Para el caso que se estudia la recuperación de elementos o especies valiosas, un parámetro de importancia es la velocidad de la recuperación, por lo que se busca un modelo

matemático para la evaluación y el análisis del proceso de concentración o lixiviación, así como para la optimización y simulación [3].

El primer modelo cinético presentado es el de García Zúñiga (1), se basa en el supuesto que la velocidad de colisión de partículas es de primer orden con respecto al número de partículas presentes y la concentración de la solución en el sistema permanece constante [4].

La ecuación cinética se expresa de la siguiente forma [5]:

$$R(t) = R_{max}(1 - e^{-kt}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

El segundo modelo cinético presentado es el Rápido-Lento (2), matemáticamente este modelo se describe como:

$$R(t) = R_{max}[(\theta_r(1 - e^{-k_r t}) + \theta_l(1 - e^{-k_l t}))]; \quad \theta_r + \theta_l = 1 \quad \dots \dots \dots (2)$$

El tercer modelo cinético presentado es el de Klimpel (3), su ecuación es la siguiente:

$$R(t) = R_{max}[1 - \frac{1}{kt}(1 - e^{-kt})] \quad \dots \dots \dots (3)$$

Donde R es la recuperación del elemento útil, k es la constante de velocidad de primer orden, t es el tiempo de lixiviación,  $R_{max}$  = Recuperación máxima [6].

El cuarto modelo cinético presentado es el de recuperación de orden n, linealizado, donde CA representa la concentración de plata en solución (4).

$$\text{Log } CA - \text{Log } CA_0 = -kt \quad \dots \dots \dots (4)$$

Finalmente, el modelo cinético presentado es el de modelo de núcleo decreciente (5) que involucra un proceso cinético controlado por reacción química, además describe la velocidad de disolución a diferente tamaño de partícula en la constante de velocidad, k [7].

Su ecuación es la siguiente:

$$1 - [1 - X]^{\frac{1}{3}} = kt \quad \dots \dots \dots (5)$$

Para el presente trabajo se desarrollaron los cinco modelos descritos para hacer el análisis y simulación con los datos experimentales.

## Metodología

Los siguientes datos experimentales de recuperación de plata a partir de jarositas industriales fueron obtenidos con las pruebas de lixiviación con tiourea y oxalato [1] bajo las siguientes condiciones, pH=1 a una temperatura de 50°C:

**Tabla 1: Datos experimentales de la recuperación de plata en jarositas con tiourea.**

Tiempo (h)	0.00	0.17	0.33	0.50	1.00	1.50	2.00
%R (Ag)	4.18%	43.92%	53.80%	60.63%	75.95%	88.80%	94.62%

Posteriormente se usaron los diferentes modelos cinéticos para después comparar cuál presenta un mejor ajuste a los datos experimentales. Los modelos considerados para este fin son los siguientes modelos de primer orden, García Zúñiga, Rápido-Lento, Klimpel, ecuación de orden n y núcleo decreciente.

Con el modelo cinético de mejor ajuste se determinó el número de tanques y el volumen de los tanques (6) de agitación continua (CSTR), con una concentración inicial  $CA_0 = 158 \frac{g}{t} Ag$  y un  $F_0 = 30 \frac{m^3}{h}$ .

$$V_n = \frac{CA_0 * Flujo pulpa * (R_n - R_{n-1})}{-r_{An}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

Además, se procedió a determinar el volumen promedio que debe tener cada tanque (7).

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}{5} = \frac{V_T}{5} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Con todos los datos obtenidos de las expresiones anteriores, se procedió a la simulación en el software Matlab-Simulink®, para ello es necesario determinar concentración  $CA$ , se partió de la ecuación (8) y de ahí la ecuación diferencial (9).

$$A = F_0 CA = V \frac{d(CA)}{dt} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dCA_1}{dt} = \frac{F_0 CA_0 - F_1 CA_1}{V_1} - kCA_1^n \quad \dots\dots\dots (9)$$

Llegado a este punto, en el reactor CSTR se obtiene una concentración en el primer tanque con la ecuación (9) y para el cálculo de la recuperación, la ecuación (10).

$$\%R = \frac{CA_0 - CA_1}{CA_1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Colocando un segundo reactor en serie, el modelo para el segundo reactor se presenta en la ecuación (11) y la recuperación la ecuación (12).

$$\frac{dCA_2}{dt} = \frac{F_1 CA_1 - F_2 CA_2}{V} - kCA_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\%R = \frac{CA_0 - CA_2}{CA_2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Y se procede a hacer el mismo calculo para el tercer, cuarto y quinto tanque.

Por último, se determina el promedio de los volúmenes de cada tanque (12).

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5}{5} \quad \dots\dots\dots (13)$$

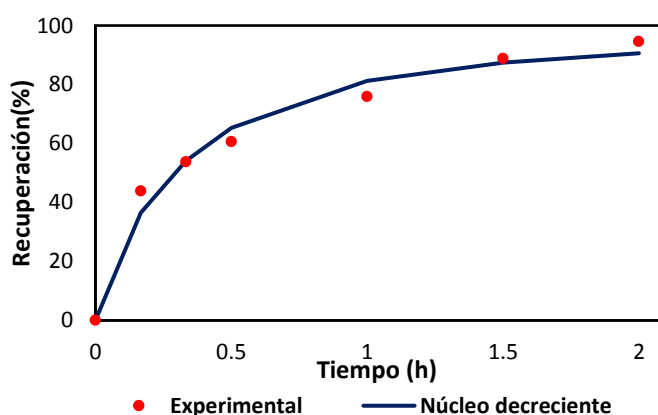
## Resultados

Se presentan los resultados de la elección del modelo cinético y ajuste de datos de recuperación de plata a partir de jarositas con tiourea y oxalato (tabla 2).

**Tabla 2: Modelos cinéticos en la recuperación de plata a partir de jarositas con tiourea.**

	Rápido-Lento	Garcia-Zuñiga	Klimpel	Orden n	Núcleo decreciente
$R_{max}$	0.888	0.888	0.981	-	-
K	-	0.047	0.059	0.013	0.050
$\theta_r, \theta_l$	0.500	-	-	-	-
$k_r, k_l$	0.047	-	-	-	-
$\theta_r + \theta_l$	1.000	-	-	-	-
Error total	0.027	0.027	0.016	0.016	0.012

Del ajuste de los resultados experimentales a los cinco modelos presentados, rápido-lento, Garcia-Zuñiga, orden n y núcleo decreciente se obtuvieron los errores al ajuste de 0.027 rápido-lento y Garcia-Zuñiga, 0.016 Klimpel y Orden, y 0.012 para el modelo de núcleo decreciente por lo que este modelo muestra una mejor descripción de los resultados experimentales obtenidos bajo las condiciones experimentales para la lixiviación de la plata (Figura 1) con un orden  $n = 1$  y con una constante de velocidad,  $k = 0.05$ .



**Figura 1: Modelo del núcleo decreciente.**



Sustituyendo en la ecuación (6), se obtuvieron los volúmenes de cada tanque y con la ecuación (9) se determina la concentración en cada tanque (ver tabla 3).

**Tabla 3: Obtención de volumen y concentración en cada tanque.**

Tanque	Volumen [ $m^3$ ]	$\frac{dCA}{dt}$	$Ag, CA \frac{g}{t}$
TK-1	809	$\frac{\left(30 \frac{m^3}{h}\right)\left(158 \frac{g}{t}\right) - \left(30 \frac{m^3}{h}\right)(CA_1)}{287.3 m^3} - (0.05)(CA_1)$	101.3
TK-2	287	$\frac{\left(30 \frac{m^3}{h}\right)\left(101.3 \frac{g}{t}\right) - \left(30 \frac{m^3}{h}\right)(CA_2)}{287.3 m^3} - (0.05)(CA_2)$	65.04
TK-3	139	$\frac{\left(30 \frac{m^3}{h}\right)\left(65.04 \frac{g}{t}\right) - \left(30 \frac{m^3}{h}\right)(CA_3)}{287.3 m^3} - (0.05)(CA_3)$	42.11
TK-4	149	$\frac{\left(30 \frac{m^3}{h}\right)\left(42.11 \frac{g}{t}\right) - \left(30 \frac{m^3}{h}\right)(CA_4)}{287.3 m^3} - (0.05)(CA_4)$	27.9
TK-5	52	$\frac{\left(30 \frac{m^3}{h}\right)\left(27.9 \frac{g}{t}\right) - \left(30 \frac{m^3}{h}\right)(CA_5)}{287.3 m^3} - (0.05)(CA_5)$	19.4

El volumen promedio de cada reactor que se obtuvo de la ecuación (12) para procesar  $30 \frac{m^3}{h}$  pulpa, con una ley de oro de  $158 \frac{g}{t}$  Ag.

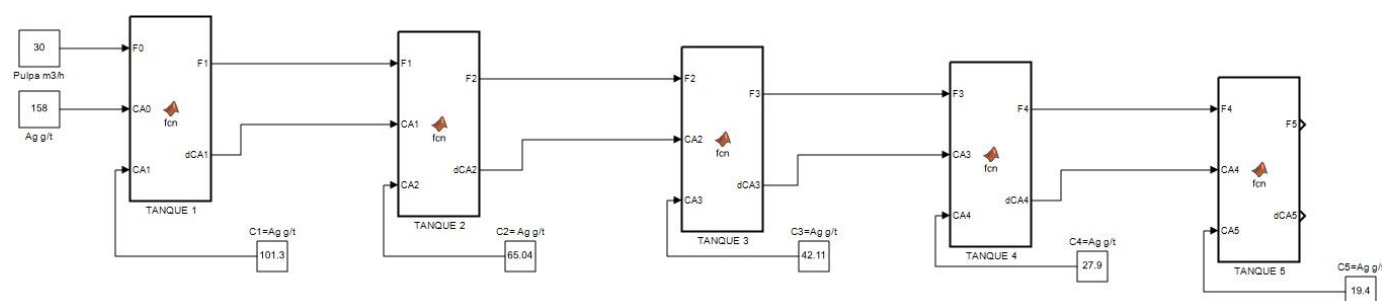
$$V = \frac{1437 [m^3]}{5} = 287.30 [m^3]$$

Las recuperaciones en cada tanque se presentan en la tabla 4 a un tiempo de 47.88 horas:

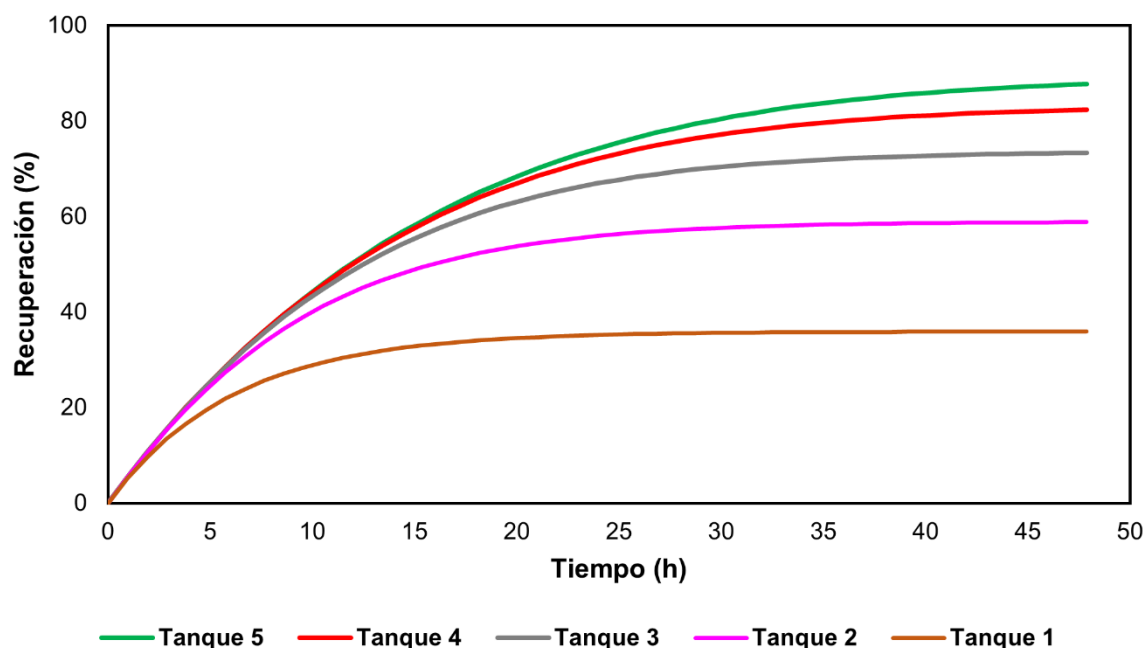
**Tabla 4: Recuperación de plata en jarositas con tiourea y oxalato en g/t por tanque.**

Recuperación de Plata (%)				
TK-1	TK-2	TK-3	TK-4	TK-5
35.92	58.94	73.35	82.34	87.72

Los resultados que se obtuvieron de la simulación del proceso con ayuda del software Matlab-Simulink® en bloques de subsistemas se presentan en la figura 2 y la gráfica de recuperación en cada tanque con respecto al tiempo se muestra en la figura 3.


**Figura 2: Modelamiento y simulación en el software Matlab-Simulink®**

En la figura 2, se muestra parte de la simulación obtenida con ayuda del software Matlab-Simulink con un flujo constante en cada tanque de  $30 \frac{m^3}{h}$  y una concentración inicial de  $158 \frac{g}{t}$  de Ag; en el primer tanque la concentración de plata que se obtiene es de  $101.3 \frac{g}{t}$ , el segundo tanque tiene una concentración  $65.04 \frac{g}{t}$ , el tercer tanque  $42.11 \frac{g}{t}$ , el cuarto  $27.9 \frac{g}{t}$  y el último tanque permite obtener una concentración de  $19.4 \frac{g}{t}$ .



**Figura 3: Gráfica de las recuperaciones en cada tanque**

Para las recuperaciones obtenidas en cada tanque, la figura 3 muestra el porcentaje de lixiviación de plata con tiourea y oxalato a partir de jarositas en un tiempo de 47.88 horas. En el primer tanque se obtiene una recuperación del 35.92%, el segundo 58.94%, el tercero 73.35%, el cuarto de 82.34% y el último tanque es de 87.92%.

## Reconocimientos

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México IA 106221.

## Conclusión

De los cinco modelos presentados, el modelo con un mejor ajuste para la lixiviación con tiourea y oxalato de las jarositas para obtener plata, bajo una temperatura 50 [°C] y un pH=1 fue el de núcleo decreciente, debido a que representa una mejor descripción de los resultados experimentales con un error total de 0.012 para una constante de velocidad de 0.05.

Se determinó que con flujo constante igual a  $30 \frac{m^3}{h}$  en los 5 reactores CSTR se obtiene una recuperación del 87.72% de plata a partir de las jarositas con contenidos de plata, equivalente a  $175.54 \frac{oz}{día}$ .

Se presenta la simulación de una planta de agitación en tanques de lixiviación mediante el software Matlab-Simulink®, así como la representación gráfica del modelado de la recuperación en cada tanque con respecto al tiempo.

## Referencias

- [1] D. Calla-Choque, G.T. Lapidus, “Jarosite dissolution kinetics in the presence of acidic thiourea and oxalate media”, *Hidrometallurgy*, vol. 206, pp. 1-6, January 2021.
- [2] D. Calla-Choque, “ Tratamiento de los residuos del proceso jarosita de la industria metalurgica del zinc, con la finalidad de mitigar este pasivo ambiental”, Tesis de maestria, Universidad Nacional de Ingenieria, UNI, Lima, Perú, 2012.
- [3] M. Alvarez-Silva, L. Vinnett , R. Langlois, K.E. Waters, “A comparison of the predictability of batch flotation kinetic models”, *Mineral Engineering* , vol 174, August 2016.
- [4] O. Peña i Lillo, “Principios de Flotación Selectiva aplicados a minerales complejos”, *Boletín minero de la Sociedad Nacional de Minería*, vol. 47, pp.113, Febrero de 1935.
- [5] R. Klimpel, “Selección de reactivos químicos para flotación”, *SME*, vol.33 , pp16, Enero 1980.
- [6] T. Coleman, M.A. Branch, A. Grace. *Optimization Toolbox*. 2nd ed. USA:The Math Works, Inc.1996.
- [7] K.C. Lillrell “Shrinking core models in hydrometallurgy: What students are not being told about the pseudo-steady approximation”, *Hidrometallurgy*, vol. 79, pp. 62-68, September 2005.

### Cómo citar este artículo:

Robles Ramos, R., Reyna Robledo, M. J., Calla Choque, D., & Santos Jallath, J. E. (2022). MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE PLATA CON TIOUREA. *EPISTEMUS*, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.210>