



Estudio del comportamiento reológico de pulpas de mineral con diferentes tamaños de partícula y su efecto en la hidrodinámica de un biorreactor con agitación continua (CSTR) en un proceso de biolixiviación

Luis Medina Torres^{1*}, Luis Antonio Ramírez-Torres²,
Diola Marina Nuñez-Ramírez³, O. Manero²

¹ *Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México

² Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México

³ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, 34120, Durango, México

*luismt@unam.mx

Resumen

El presente trabajo contribuye a la comprensión del proceso de biolixiviación para la purificación de concentrados de hierro en función de su respuesta reológica, y por medio de un análisis hidrodinámico computacional, a la mejora de las condiciones de flujo en un biorreactor de agitación continua (CSTR). Específicamente, se estudió la respuesta reológica de dos tamaños de partícula en las pulpas de mineral ($\bar{D}_p = 44 \mu\text{m}$ y $72 \mu\text{m}$). La respuesta reológica de las pulpas de mineral a flujo cortante simple estacionario (FS) y a flujo oscilatorio de pequeña amplitud de deformación (SAOS) mostraron que, a un menor tamaño de partícula, aumentó su respuesta reológica y, por ende, disminuyó el tiempo del proceso de biolixiviación en un biorre-

actor. El espectro mecánico al flujo de las pulpas de minerales con menor tamaño de partícula presentó una fuerza de gel de $S = 0.0468 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ con un exponente de $n_r = 0.802$ a tiempos de relajación cortos. Por otro lado, el estudio hidrodinámico del biorreactor realizado a través de la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) empleando el software comercial *COMSOL Multiphysics 6.1*, mostró que, a partir de una velocidad de agitación (N) de 200 rpm en el biorreactor, las líneas de corriente presentaron la misma forma. Además, estas no se ven alteradas por la respuesta reológica. La comparación de las líneas de corriente y las curvas de flujo adimensionales (N_p vs Re) en las distintas configuraciones duales de impulsores (*Rushton-Maxflo*), sugieren que la mejor configuración de impulsores

fue la *Rushton* (arriba)-*Maxflo*(abajo), ya que estas generan un ahorro energético de $\approx 9\%$ en comparación con las demás configuraciones. Finalmente, al analizar los mapas de viscosidad a las diferentes velocidades de agitación en el biorreactor se observó que a una velocidad de agitación de 400 rpm se obtienen las mejores condiciones de mezclado, es decir, una mejor homogeneidad de las pulpas de mineral en todo el biorreactor (CSTR), evitando su sedimentación y favoreciendo el proceso de biolixiviación.

Palabras clave

Reología, hidrodinámica, pulpas de mineral, biolixiviación, dinámica de fluidos computacionales (CFD).

Introducción

En la actualidad, la industria minera busca alternativas para la optimización de los procesos existentes para la extracción de metales valiosos (como por ejemplo Au, Ag, Fe). Estudios recientes proponen el uso de la biolixiviación para remover impurezas en los concentrados de hierro, debido a sus ventajas económicas y ambientales [1]. La biolixiviación es la remoción de metales presentes en una matriz sólida, a una fase líquida, mediante la acción catalítica de microorganismos acidófilos [1-3]. En la purificación de concentrados de minerales mediante procesos de biolixiviación en un biorreactor (CSTR), es de suma importancia la caracterización reológica de las pulpas de mineral, así como, el análisis hidrodinámico del biorreactor con los diferentes tipos de impulsores empleados [3-5]. Un sistema de biolixiviación consta de una fase discontinua sólida (mineral) a la cual se adhiere una biopelícula, y una fase continua acuosa donde se encuentran diluidos los sustratos

[5, 6]. El objetivo de este trabajo fue estudiar la caracterización y modelado reológico, así como, el análisis hidrodinámico en un biorreactor CSTR en función del tiempo de un proceso de biolixiviación, tomando en cuenta varios factores, tales como: El tamaño de partícula y la modificación de la concentración de la densidad de pulpa de mineral, ambos, de suma importancia en la optimización de procesos bio-hidro-metalúrgicos [7,8].

Metodología

Concentrado mineral, cepa microbiológica y medio de cultivo

El concentrado de hierro se obtuvo de una mina en Monclova, Coahuila, México. Para la biolixiviación se utilizó una sepa nativa tomada de efluentes mineros, la cual se hizo crecer en un medio 9k a un pH = 1. El proceso de biolixiviación se llevó a cabo en un CSTR (Bio Flo Cellingén 115, Brunswick, USA) con un sistema dual de impulsores comerciales Rushton-Maxflo, un volumen de trabajo de 7 L a 30 % (p/p) de sólidos. Se usaron 2 tamaños de partícula promedio \bar{D}_p : 44 μm y 72 μm de acuerdo a la serie de tamices U.S. Tyler [5].

Capacidad del biorreactor y dimensiones del sistema impulsor

La capacidad del CSTR a escala laboratorio fue de 10 L (Bio Flo Cellingén 115, Brunswick, USA) con un volumen de trabajo de 7 L. Además, este consta de dos baffles. El sistema de mezclado consta de un eje de rotación con dos impulsores: en la parte de arriba del eje de rotación se varió la colocación de cada uno de los impulsores, ya sea un tipo radial (*Rushton*) y/o axial (*Maxflo*); también, en la parte inferior se colocó un impulsor de tipo radial y/o axial separados por una distancia $C = D_a = 66\text{ mm}$, donde

D_a es el diámetro de ambos impulsores; el largo y el diámetro del eje impulsor, L y D_L , fue de $2C$ y $1/10D_a$, respectivamente [5].

Caracterización y modelado reológico

Se tomaron muestras de la pulpa mineral directamente del biorreactor (10 mL) para los diferentes tamaños de partícula promedio de $44 \mu\text{m}$ y de $72 \mu\text{m}$ en cada día del proceso de biolixiviación, y ambas corridas experimentales se realizaron por triplicado para determinar la cinética de biolixiviación en el tanque. Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas reológicas: Flujo cortante simple en estado estacionario (FS), y flujo oscilatorio de pequeña amplitud de deformación (SAOS), empleando un reómetro de esfuerzos controlados (Discovery HR-3, TA Instruments, U.S.A.) con una geometría helicoidal. Todas las pruebas se llevaron a cabo a una temperatura constante de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ controlada mediante un sistema Peltier (Polystat, Cole-Parmer, USA). El comportamiento reológico de las pulpas para ambos tamaños de partícula en FS fue ajustada adecuadamente con el modelo cinético-reológico de Bautista-Manero-Puig (BMP) [5], y para el flujo de SAOS fue necesario emplear tanto el modelo multimodal de Maxwell (MM) y el modelo de Winter-Chambon (WC), los cuales ajustan adecuadamente los datos reológicos de las pulpas de mineral obtenidos en la cinética de biolixiviación.

Dinámica de fluidos computacional (CFD) para la hidrodinámica del biorreactor

Las simulaciones computacionales se llevaron a cabo en el software comercial COMSOL *Multiphysics* 6.1 (Licencia #3080377) a través de los siguientes módulos: *CFD Module* y *Mixer Module* (HP Z2 G4 Workstation, Hewlett-Packard, U.S.A.). Básicamente, las

ecuaciones de balance de masa y balance de momentum fueron resueltas mediante el método de elemento finito (método de Galerkin). Por otro lado, se realizaron simulaciones a distintas configuraciones de impulsores Rushton y/o Maxflo durante la cinética de biolixiviación de las pulpas minerales con diferente tamaño de partícula ($\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$ y $\overline{D}_p = 72 \mu\text{m}$), en un rango de velocidad de agitación 1-1000 rpm.

Curvas de potencia adimensional

La estimación del número de potencia adimensional N_p y el N_{ReNN} para cada configuración de impulsores impuesta, a la cantidad de elementos tetraédricos definidos mediante un refinamiento de malla, se calculó a través de las ecuaciones (1 y 2):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5}$$

Donde, P es el consumo de poder, ρ es la densidad de la pulpa mineral, N es la velocidad de agitación, y D_a es el diámetro de los impulsores.

$$N_{NN} = \rho N (1.2D_a)^2 \varphi_{ss} = \frac{\rho N (1.2D_a)^2}{\eta(\dot{\gamma})}$$

Donde, N es la velocidad de agitación, φ_{ss} fue obtenido a la $\dot{\gamma}_{av}$ usando la correlación de Metzner-Otto [5].

Posteriormente, se realizaron las curvas de flujo adimensionales N_p vs N_{ReNN} para cada configuración de impulsores empleada durante la agitación de las pulpas minerales, con los diferentes tamaños de \overline{D}_p en función de tiempo del proceso de la biolixiviación, las configuraciones de impulsores empleadas fueron las siguientes: *Rushton* (R), *Maxflo* (M), *Rushton – Rushton* (R-R), *Maxflo – Maxflo* (M-M), *Rushton* (arriba) – *Maxflo* (abajo) (R-M), *Maxflo* (arriba)-*Rushton* (abajo) (M-R). El número de Reynolds

generalizado, (NReNN), en el régimen de transición y turbulento, fueron obtenidos mediante el algoritmo propuesto por Wassmer & Hugenberg [5].

Propiedades hidrodinámicas del tanque de agitación continua

El campo de velocidades en régimen laminar fue obtenido resolviendo simultáneamente los balances de masa y *momentum*, asimismo, el campo de velocidades en régimen turbulento se obtuvo resolviendo los balances de masa, *momentum*, energía cinética y disipación de energía cinética del modelo κ - ϵ del enfoque RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes). Adicionalmente, también se obtuvieron (para ambos regímenes de flujo) los mapas de viscosidad aparente, el campo vectorial de la velocidad y las líneas de corriente. En toda la simulación numérica se llevó a cabo un refinamiento de malla.

Discusión de resultados Respuesta reológica

Curvas de: Flujo cortante simple estacionario

La Figura 1 muestra las curvas de flujo a la cizalla simple de las pulpas minerales en función del tiempo de proceso de la biolixiviación y a los dos tamaños de partícula (\overline{D}_p), junto con la predicción del modelo BMP. El valor de la constante cinética β del modelo de BMP mostrada en la Figura 1A, indica que, en la máxima respuesta viscosa el valor de β es mínimo, es decir, la estructura formada por los microorganismos y las pulpas minerales son más resistentes al flujo en comparación con los otros días de la cinética de biolixiviación.[3, 4] Lo anterior probablemente se debe a la formación de una biopelícula (EPS), y la cantidad de EPS excretados por los microorganismos que promueven la genera-

ción de puntos de contacto en el sistema[6]. Nótese que el valor mínimo de β de la Figura 1A es menor en comparación al mínimo de la Figura 1B, lo que refuerza el hecho de que las condiciones de biolixiviación de la Figura 1B hace que los microorganismos se desarrollen mejor y más rápido por el tamaño de partícula. Finalmente, ambos tamaños de partícula (\overline{D}_p) en la cinética de biolixiviación, las pulpas minerales exhiben un comportamiento no Newtoniano del tipo adelgazante al flujo ($n < 1$). Además, todas las curvas de flujo muestran uno o varios cambios de pendiente manifestando un comportamiento de reología compleja, es decir, intervienen varios factores inherentes a la estructura que exhiben estos comportamientos de un fluido complejo, y no de un fluido de reología simple (como el agua). Así pues, para las pulpas con $\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$ el máximo de viscosidad se manifestó al día 3, y para $\overline{D}_p = 72 \mu\text{m}$ se alcanzó al día 5 del proceso de biolixiviación. Adicionalmente, se observó que conforme \overline{D}_p disminuye (comparar las Figuras 1A y 1B), la pendiente de adelgazamiento es cada vez mayor, esto puede deberse a la estructura de la biopelícula. Nótese que, el cambio de pendiente con el tiempo de la Figura 1A es menor al mostrado en la Figura 1B, lo que supone de manera indirecta que, a menor tamaño \overline{D}_p , los microorganismos en contacto con la pulpa de mineral se reproducen más rápidamente (EPS) [5].

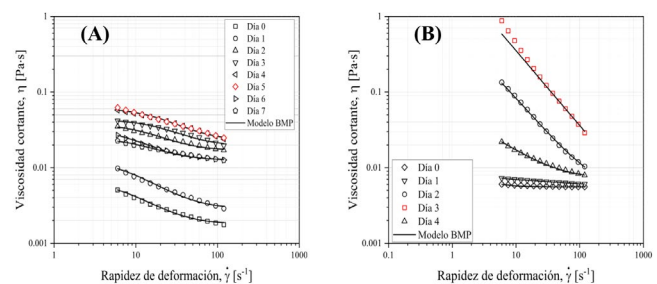


Figura 1. Prueba de flujo cortante simple estacionario a diferentes tiempos de biolixiviación. (A) $\overline{D}_p = 72 \mu\text{m}$ y (B) $\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$. (En rojo se remarca la máxima respuesta viscosa)

Flujo oscilatorio de pequeña amplitud de deformación

En la Figura 2 se muestra la respuesta viscoelástica lineal de las pulpas a diferentes tiempos del proceso de biolixiviación, junto con la predicción de los modelos de Maxwell multimodal y Winter-Chambon. Es preciso recalcar que en todas las pruebas de SAOS $G'' > G'$, comportamiento muy común en este tipo de suspensiones coloidales de pulpas de mineral [5]. Comparativamente, la máxima respuesta viscoelástica de las pulpas con $\bar{D}_p = 44 \mu\text{m}$ fue mayor y en menos tiempo que el máximo detectado para $\bar{D}_p = 72 \mu\text{m}$, lo que concuerda con lo observado en las curvas de flujo a la cizalla simple (Figura 1). Además, en los días 3 y 4 de la Figura 2B se detectó un ligero comportamiento de tipo pseudo *solid-like* (es decir, donde los módulos viscoelásticos respecto a la frecuencia son paralelos), lo anterior probablemente indica la presencia de un gel débil amorfo en las pulpas minerales debido a la formación de la biopelícula y a la alta concentración de exopolisacáridos producto de la reproducción bacteriana, mostrando una fuerza de gel $S = 0.066 \text{ Pa}\cdot\text{sn}$ y un exponente de relajación $n_r = 0.7642$. El valor de fuerza de gel es mayor al reportado por Núñez-Ramírez et al (2019) [3] (con una fuerza de gel de $S = 0.0151 \text{ Pa}\cdot\text{sn}$), esto podría deberse al tamaño de partícula, lo que hace que tenga mayor área de contacto. Cabe mencionar que estos valores se obtienen de acuerdo al criterio de Winter y Chambon (1986; 1997) [5]. El punto de gel se refiere al intervalo donde la tangente de pérdida es independiente de la frecuencia en las curvas de flujo a la cizalla oscilatoria [9].

Hidrodinámica del biorreactor

Refinamiento de malla

En cada simulación se realizó un refinamiento de malla, esto es, se analizó el efecto de

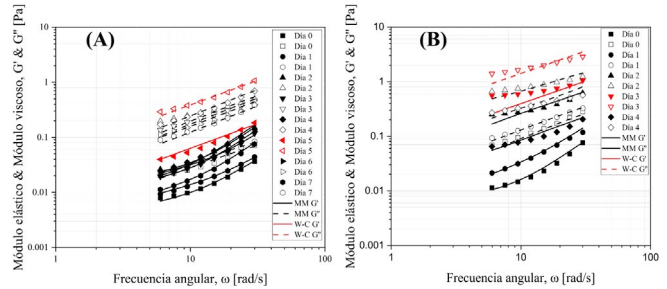


Figura 2. Prueba de flujo oscilatorio de pequeña amplitud (SAOS) a diferentes tiempos de proceso y distinto tamaño de partícula. A) $\bar{D}_p = 72 \mu\text{m}$ y B) $\bar{D}_p = 44 \mu\text{m}$. En rojo se resaltan las máximas respuestas. * (símbolos llenos G' , y símbolos vacíos, G'').

la cantidad de elementos tetraédricos, del método de Galerkin (elemento finito), en el mallado del dominio de flujo con el valor del par de torsión requerido para hacer fluir las pulpas minerales.[10] Se realizaron un aproximado de 500 simulaciones. Se encontró que el mallado computacionalmente óptimo fue con 1 1946 106 elementos totales, de los cuales 1 163 060 son elementos del dominio de flujo, 28 986 son elementos en las interfases: sólido-líquido y líquido-líquido y 2 528 son elementos de aristas.

Líneas de corriente de distintas configuraciones de impulsores

En la Figura 3 se muestran las líneas de corriente del biorreactor a $N = 400 \text{ rpm}$ para algunas configuraciones de impulsores en las pulpas con $\bar{D}_p = 72 \mu\text{m}$ al día 5. En la Figura 3 se deduce de manera cualitativa que las configuraciones que más ventajas hidrodinámicas presentan, en términos de una mejor distribución de zonas de mezclado y líneas de corriente, son las mostradas por las Figuras 3C y 3D, es decir, las configuraciones: *Maxflo* arriba-Rushton abajo (M-R) y Rushton arriba-*Maxflo* abajo (R-M).

Curvas de potencia de forma adimensional

Por otro lado, las curvas de N_p vs N_{ReNN} se analizaron para todas las configuraciones

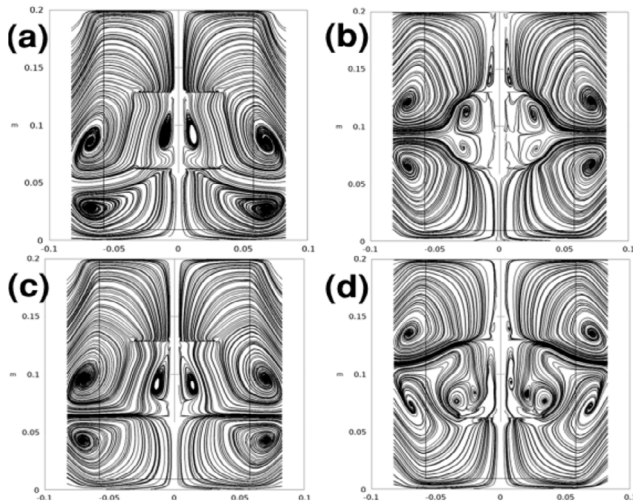


Figura 3. Líneas de corriente en planos zy de las pulpas minerales con $\bar{D}_p = 72 \mu\text{m}$ a distintas configuraciones de impulsores: (A) M-M, (B) R-R, (C) M-R, (D) R-M

propuestas mostradas en la sección anterior. Donde, se puede apreciar en la Figura 4 que, entre las configuraciones que mejores zonas de mezclado generan, la configuración R-M exhibe una generación de potencia menor en comparación con la configuración M-R, se propone entonces que la configuración óptima de mezclado (mejor homogeneidad) para pulpas de mineral en el biorreactor fue *Rushton arriba- Maxflo abajo* (R-M).

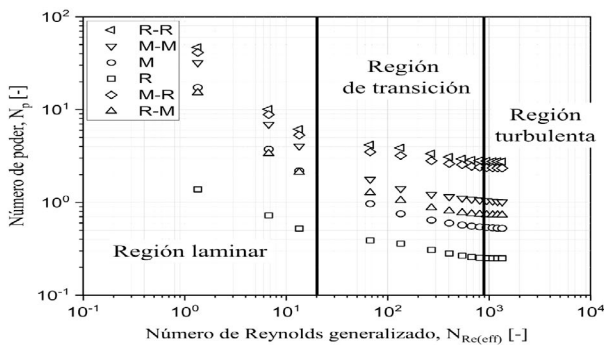


Figura 4. Potencia adimensional versus el número de Reynolds generalizado para distintas configuraciones de impulsores.

En la Figura 5 se muestran las líneas de corriente a distintas velocidades de agitación de la configuración R-M para las pulpas con una $\bar{D}_p = 72 \mu\text{m}$. Cabe hacer notar que, a partir de 200 rpm (Figura 5F) las líneas de

corriente permanecen prácticamente idénticas aun con el incremento de la velocidad de agitación en el CSTR.

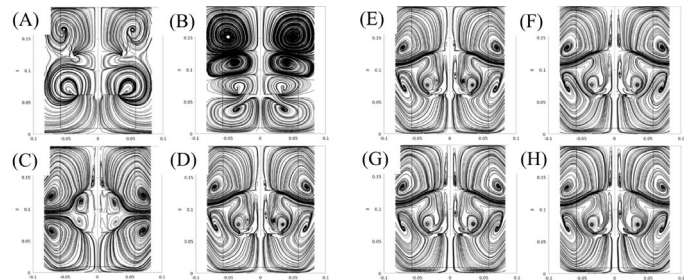


Figura 5. Líneas de corriente a distintas velocidades de agitación para la configuración R-M al día 3 de biolixiviación de pulpas con $\bar{D}_p = 44 \mu\text{m}$: A) 1 rpm, B) 5 rpm, C) 10 rpm, D) 50 rpm, E) 100 rpm, F) 200 rpm, G) 500 rpm, H) 800 rpm.

Adicionalmente, la Figura 6 muestra el $\log(\eta_{app})$ de las pulpas con $\bar{D}_p = 44 \mu\text{m}$ al día 3 del proceso de biolixiviación con la configuración R-M a distintas N (200 a 800 rpm). Se puede observar que el mapa de viscosidades mostrado en la Figura 7 (a N=400 rpm) podría ser una buena elección de operación del proceso de biolixiviación, debido a que en todo el volumen del tanque de agitación existen zonas bien mezcladas “homogéneas” (ver Figura 3D) y, al menos, ligeramente desestructuradas minimizando zonas con 0 (estructura estática), donde existen posibilidades de precipitación de las partículas minerales. [8]

Finalmente, en la Figura 7 se observan cambios repentinos de viscosidad entre el día 2 (Figura 7B) y el día 3 (Figura 7C) debido a la cinética de crecimiento exponencial del microorganismo (una interacción entre las fuerzas intermoleculares, las partículas de las pulpas y la formación de la biopelícula), y finalmente, en esta cinética se exhibe la etapa de muerte bacteriana (Figura 7D), lo cual se refleja en una disminución de la viscosidad aparente en todo el volumen del biorreactor (CSTR), es decir, la actividad mi-

crobiana en la biolixiviación se ve afectada positivamente al disminuir el tamaño de partícula, debido a una mayor área de contacto entre el mineral y el microorganismo, similar a lo reportado en la literatura por Núñez-Ramírez et al (2019) [5].

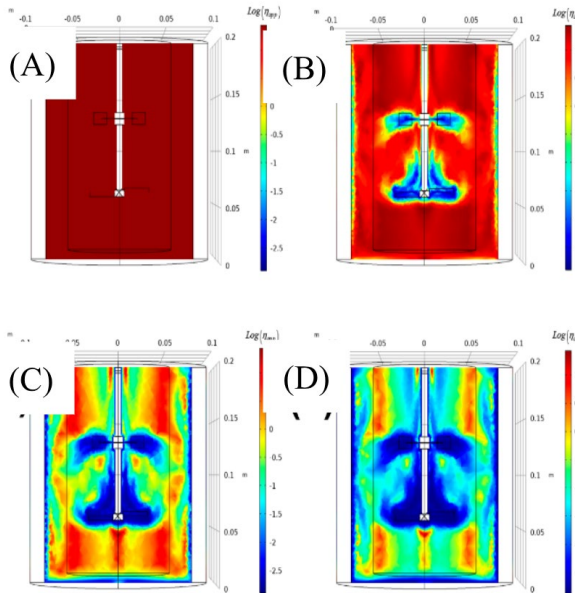


Figura 6. Mapas de viscosidad aparente de la configuración R-M a distintas velocidades para las pulpas con $\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$ al día 3 de biolixiviación. A) 1 rpm, B) 100 rpm, C) 400 rpm, D) 800 rpm

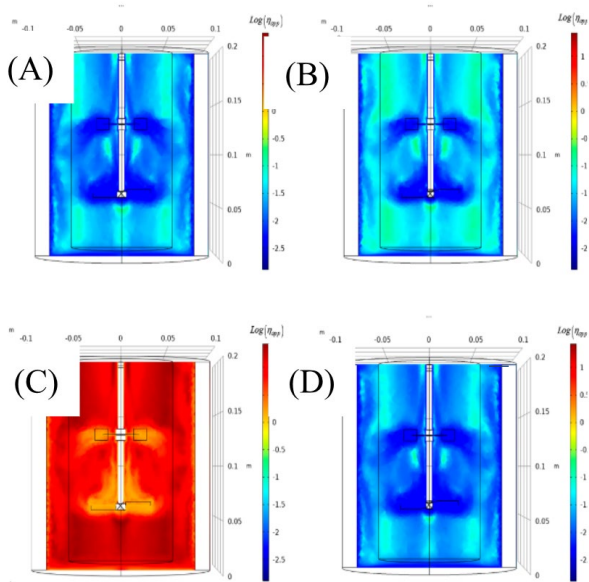


Figura 7. Mapas de viscosidad aparente de la configuración R-M a 400 rpm para las pulpas con $\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$ durante la cinética de biolixiviación. A) Día 1, B) Día 2, C) Día 3, D) Día 4

Conclusiones

Las pulpas de mineral mostraron que, al disminuir el tamaño de partícula, la viscosidad aumenta, y la máxima respuesta reológica se presentó a un menor tiempo del proceso de biolixiviación. En la máxima respuesta de SAOS en ambas pulpas minerales ($\overline{D}_p = 44 \mu\text{m}$ y $\overline{D}_p = 72 \mu\text{m}$.) se observó un punto de gel que se relaciona indirectamente al microorganismo y a la formación la biopelícula.

El análisis de las líneas de corriente y las curvas de potencia adimensional mostraron que la combinación de impulsores *Rushton arriba-Maxflo* abajo (R-M) generan un mejor mezclado (mayor homogeneidad) evitando la sedimentación y el estancamiento de partículas en el CSTR, además de brindar un ahorro en el consumo de potencia al comparar con las demás configuraciones de impulsores empleados de un 9 %.

Finalmente, las líneas de corriente se vuelven independientes de N a partir de 200 rpm, lo que concuerda con la transición de régimen laminar a régimen transitorio de las curvas de potencia para la mayoría de las configuraciones de impulsores empleados en la industria. La velocidad de agitación de 400 rpm mostró mapas de viscosidad aparente, donde se observan pocas zonas de η_0 y zonas de homogeneidad, sin llegar a alterar las pulpas de mineral y, por ende, a los microorganismos presentes en el proceso de biolixiviación.

El comportamiento reológico de pulpas de mineral con diferentes tamaños de partícula y su efecto en la hidrodinámica de un bio-reactor, puede ser de utilidad para optimización de procesos en tanques de mezclado en la industria bio-hidrometalúrgica.

Referencias

- 1 Roberto, F.F. and A. Schippers, Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the mineral industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106: p. 5913-5928, 2022.
- 2 Kara, I.T. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for recovery: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21: p. 3329–3350, 2023.
- 3 Núñez-Ramírez, D.M., Ramírez-Torres, L.A., Medina-Torres, L., Calderas F., et al. "A rheological study of the bioleaching process of an iron ore for the elimination of gangue minerals". *Minerals Engineering*, 144, p. 1-10, 2019.
- 4 Núñez-Ramírez, D.M., et al., Mixing Analysis for a Fermentation Broth of the Fungus *Beauveria bassiana* under Different Hydrodynamic Conditions in a Bioreactor. *Chemical Engineering & Technology*, 35(11), 2012.
- 5 Ramírez-Torres, L.A., Medina-Torres, L., Calderas, F., Núñez-Ramírez, D.M., Manero, O. "Rheology and Hydrodynamics of Iron Ore Mineral Pulps during a Bioleaching Process in a Continuous Stirred-Tank Reactor". *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 46, No. 4, p. 670-680, 2022.
- 6 Chéron, J., et al., CFD numerical simulation of particle suspension and hidromechanical stress in various designs of multi-stage bioleaching reactors. *Hydrometallurgy*, 197: p. 1-12, 2020.
- 7 Núñez-Ramírez, D.M., et al., Mixing Analysis for a Fermentation Broth of the Fungus *Beauveria bassiana* under Different Hydrodynamic Conditions in a Bioreactor. *Chemical Engineering & Technology*, 35(11): p. 1954-1961, 2012.
- 8 Metzner, A.B. and J.S. Taylor, Flow patterns in agitated vessels. *AIChE Journal*, 6: p. 109-114, 1960.
- 9 Bhattacharya, I.N., D. Panda, and P. Bandopadhyay, Rheological behavior of nickel laterite suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, 1998. 53: p. 251-263.
- 10 Patrício, P., et al., Living bacteria rheology: population growth, aggregation patterns and cooperative behavior under different shear flows. *Physical Review*, 90(2): p. 022720, 2014.
- 10 Coulson, J.M., Richardson, J.F., Backhurst, J.R., Harker, J.H. "Chemical Engineering Volume 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer", Butterworth-Heinemann; 1999.