

Artículo Original

**ESTUDIO CINÉTICO DE LA ADSORCIÓN DE IONES NÍQUEL (II)
EN SERRÍN DE CEDRO (CEDRELA ODORATA)**

**KINETIC STUDY OF NICKEL (II) ADSORPTION IN SAWDUST OF CEDRA
(CEDRELA ODORATA)**

Julio Omar Prieto García ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9279-4412>

Ariel Pérez Leyva ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1542-2444>

Alfredo E. Curbelo Sánchez ² <https://orcid.org/0000-0002-9955-0437>

Mixary Enríquez García ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0644-1160>

¹ Departamento Licenciatura en Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuani km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 28, 2020; Revisado: Marzo 27, 2020; Aceptado: Mayo 4, 2020

RESUMEN

Introducción:

En los últimos años se han estudiado una gran cantidad de materiales de bajo costo y con potencial de ser utilizados en la biosorción de metales pesados; estos incluyen residuos, principalmente agrícolas y forestales. El níquel es empleado en la fabricación de acero y en algunas aleaciones. Su consumo provoca diferentes problemas de salud.

Objetivo:

Determinar el modelo cinético y la difusividad correspondientes a la adsorción en el sistema heterogéneo de masa solución acuosa de iones Ni²⁺ y serrín de cedro.

Materiales y Métodos:

Se utiliza el serrín de cedro como material adsorbente. Se expone el modelo cinético que rige la adsorción de iones Ni²⁺ en serrín de cedro a las temperaturas de 25, 35 y 45°C. Se determina desde el punto de vista cinético el orden del modelo para la adsorción, la energía de activación y el calor isostérico. Se obtiene las constantes de equilibrio y con ello la energía libre, la entalpía y entropía de adsorción y los coeficientes de difusión.

Resultados y Discusión:

El modelo de pseudoprimer orden refleja el proceso adsorptivo con una energía de activación de 38,4 kJ/mol que refrenda un proceso físico. Los valores de $\Delta H_{ads} = -36,6$



Copyright © 2020. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Julio O. Prieto, Email: omarpg@uclv.edu.cu



kJ/mol y $\Delta S_{\text{ads}} = -0,14 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ refleja un proceso exotérmico. Los coeficientes de difusión oscilan del orden de 10^{-16} a $10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conclusiones:

La adsorción de iones Ni^{2+} en solución acuosa, obedece a un modelo de pseudosegundo orden. Los coeficientes de difusión a las tres temperaturas oscilan del orden de 10^{-16} a $10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$.

Palabras claves: adsorción Ni^{2+} ; cedro; cinética.

ABSTRACT

Introduction:

In the last years a great quantity of materials of low cost and with potential to be used in the biosorption of heavy metals have been studied; these include residues, mainly agricultural and forestry. Nickel is used in the manufacture of steel and some alloys. Its consumption causes different health problems.

Objective:

To determine the kinetic model and diffusivity corresponding to adsorption in the heterogeneous system of aqueous mass solution of Ni^{2+} ions and cedar sawdust.

Materials and methods:

Cedar sawdust is used as adsorbent material. The kinetic model that governs the adsorption of Ni^{2+} ions in cedar sawdust at temperatures of 25, 35 and 45 °C is exposed. The order of the adsorption model, the activation energy and the isostatic heat is determined from the kinetic point of view. The equilibrium constants, the free energy, the enthalpy and adsorption entropy and the diffusion coefficients.

Results and Discussion:

The pseudo-first order model reflects the adsorptive process with activation energy of 38.4 kJ/mol that endorses a physical process. The values of $\Delta H_{\text{ads}} = -36.6 \text{ kJ/mol}$ and $\Delta S_{\text{ads}} = -0.14 \text{ kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ reflects an exothermic process. The diffusion coefficients range from the order of 10^{-16} to $10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conclusions:

The adsorption of Ni^{2+} ions in aqueous solution, follows a pseudo-second order model. The diffusion coefficients at the three temperatures range from the order of 10^{-16} to $10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$.

Keywords: adsorption Ni^{2+} ; cedra; kinetic.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversas fuentes de contaminación por níquel de aguas naturales, siendo la principal la descarga de efluentes industriales directamente a fuentes naturales sin ningún tratamiento previo. Este problema se debe tanto a los altos costos como a la baja eficiencia de muchos de los métodos empleados para la remoción de los metales pesados. En la actualidad se ha desarrollado una diversa gama de tecnologías que apuntan a ser soluciones de bajo costo y ambientalmente amigables (Prieto y col., 2020). Una de estas técnicas es la llamada biosorción, en la cual se hace uso de materia orgánica –viva, muerta o inmovilizada– para la remoción de metales pesados y su posterior recuperación (Duygu y Kumbur 2006), (Larenas y col., 2008).

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar la capacidad de biosorción, mediante un estudio cinético de material procedente de residuos de cedro tomando en consideración el tiempo de contacto entre el biosorbente y soluciones modelos.

1.1. Características de Níquel

El níquel es un metal de transición de número atómico 28 y símbolo Ni, cuya configuración electrónica es $[Ar]3d^84s^2$ y presenta una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (Ponjuan y col., 1979). Es de color blanco plateado, conductor de la electricidad y del calor, dúctil y maleable por lo que se puede laminar, pulir y forjar fácilmente. Se encuentra en distintos minerales, en meteoritos (aleado con hierro) y en principio, hay níquel en el interior de la Tierra.

Es resistente a la corrosión y se suele utilizar como recubrimiento, mediante electrodeposición. El metal y alguna de sus aleaciones, como el monel, se utilizan para manejar el flúor y algunos fluoruros debido a que reacciona con dificultad con estos productos.

Su estado de oxidación más estable es 2+. Puede presentar otros, se han observado estados de oxidación 1+ y 3+ en complejos, pero son muy poco frecuentes. Se encuentra en distintos minerales, en meteoritos (aleado con hierro) y en principio, hay níquel en el interior de la Tierra.

1.2. Contaminación con Níquel

El níquel es un elemento natural muy abundante. Puro, es un metal duro, blanco-plateado que puede combinarse con otros metales, tales como el hierro, cobre, cromo y zinc para formar aleaciones (Ponjuan y col., 1979). Estas aleaciones se usan para fabricar monedas, joyas y artículos tales como válvulas e intercambiadores de calor. La mayor parte del níquel se usa para fabricar acero inoxidable.

El níquel es liberado a la atmósfera por industrias que manufacturan o usan níquel, sus aleaciones o compuestos. También lo liberan plantas que queman petróleo o carbón y por incineradores de basura. En el aire, se adhiere a pequeñas partículas de polvo que se depositan en el suelo o son removidas del aire en la lluvia o la nieve; esto generalmente toma varios días.

El níquel liberado en desagües industriales termina en el suelo o en el sedimento, en donde se adhiere fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso.

Se puede estar expuesto al níquel al ingerir alimentos contaminados con el mismo, lo que representa la fuente de exposición más importante para la mayoría de las personas (ATSDR, 2005). También si la piel está en contacto con el suelo, agua de baño o ducha, o metales que contienen níquel, como también al tocar monedas o joyas que lo contienen. Además, al beber agua que contiene pequeñas cantidades, al respirar aire o usar tabaco que lo contenga.

El efecto adverso más común de la exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica. Las personas pueden sensibilizarse al metal cuando hay contacto directo prolongado de la piel con artículos que lo contienen. Una vez que la persona se ha sensibilizado al níquel, el contacto adicional con el metal producirá una reacción. La reacción más común es un salpullido en el área de contacto. El salpullido también puede aparecer en un área lejos del sitio de contacto. Con menor frecuencia, algunas personas

que son sensibles al níquel sufren ataques de asma luego de exposición al mismo. Algunas personas sensibilizadas reaccionan cuando ingieren níquel en los alimentos o el agua o cuando respiran polvo que lo contiene.

El níquel puede producir bronquitis crónica y alteraciones del pulmón al ser inhaladas cantidades mucho más altas que los niveles que se encuentran normalmente en el ambiente. También puede producir dolores de estómago y efectos adversos en la sangre y los riñones (Resumen de Salud Pública, 2005).

La contaminación de iones Ni^{2+} en los afluentes acuosos está condicionado por la descarga de las aguas residuales de la industria sin tratamiento que atenúe las altas concentraciones del metal. Esta situación se debe a los altos costos y no adecuada eficiencia de los métodos empleados para la remoción de los metales pesados. En la actualidad se han desarrollado tecnologías dirigidas a solucionar el problema con costos bajos. Una de estas técnicas es la llamada biosorción, en la cual se hace uso de materia orgánica para la remoción de metales pesados y su posterior recuperación (Larenas y col., 2008).

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar la capacidad de biosorción, mediante un estudio cinético del serrín de cedro, tomando en consideración el tiempo de contacto entre el biosorbente y soluciones modelos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Técnicas empleadas en la caracterización parcial del adsorbente

Se determinan para la fracción de 0,2 mm de diámetro una serie de parámetros físicos como densidad picnométrica, aparente, aparente por aprisionamiento, compresibilidad, porosidad, velocidad de flujo, tortuosidad, factor de forma, pH y superficie específica.

El análisis inmediato caracteriza a las muestras en términos de sus contenidos de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas. En este trabajo, se llevó a cabo el análisis inmediato de los residuos de cedro, siguiendo las normas ASTM que se detallan a continuación.

2.1.1. Procedimiento según Normas ASTM

Humedad (ASTM D-3175-73)

Se calienta la muestra en estufa a 120°C hasta llegar a peso constante. Los resultados obtenidos se informan sobre la muestra original.

Volátiles (ASTM D-3175-77)

La muestra contenida en un crisol tapado, para simular atmósfera inerte, se calienta durante siete minutos a $850 \pm 10^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Cenizas (ASTM D-3174-73)

Se coloca la muestra en una mufla a temperatura ambiente y se calienta hasta llegar a una temperatura de 900°C en 4 horas, procurando una atmósfera oxidante durante toda la experiencia. El calentamiento se realiza gradualmente con el objeto de evitar pérdidas de muestra debido a una rápida expulsión de volátiles. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Carbono fijo

El mismo se obtiene por diferencia según la ecuación 1:

$$\text{Carbono Fijo (\%)} = 100 - \text{Humedad (\%)} - \text{Volátiles (\%)} - \text{Cenizas (\%)} \quad (1)$$

Estos resultados se informan en base seca.

Por último, la muestra del adsorbente se digiere en agua regia y se determina mediante las técnicas de Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA) los contenidos de calcio, potasio, sodio y magnesio.

2.2. Estudio cinético

Se prepara una disolución acuosa de 0,042 mol/L del ion Ni^{2+} . Se toman 250 mL y se le añaden 2g de serrín de cedro. Posteriormente, se toman alícuotas de 2 mL en intervalos de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos a las temperaturas de 25, 35 y 45°C y se determina la concentración de iones Ni^{2+} mediante EAA en un equipo Pye Unicam SP 9. Se realizan cinco réplicas por cada punto cinético obtenido. A ese conjunto de puntos se le determinan algunos parámetros estadísticos que describen las características de las curvas cinéticas como media, mediana, desviación estándar del gráfico inclusiva, asimetría gráfica inclusiva y la curtosis (Ostle, 1974).

2.3. Modelos cinéticos y difusivos empleados

Los modelos cinéticos y difusivos considerados son los modelos de pseudoprimer orden (SPO), pseudosegundo orden (SSO), Elovich (ME), difusión intrapartícula (DPL), difusión en los poros según Bangham (MB), difusión en la película líquida (DPL), (Prieto y col., 2019a), (Prieto y col., 2019b), (Prieto y col., 2019c), (Prieto y col., 2020). Además, se determina la energía de activación del sistema heterogéneo, la variación de entropía y entalpía "aparente" del complejo activado de adsorción y el calor isostérico involucrado en el proceso adsorptivo (Ejikeme et al., 2011), (Eyring et al., 1949), (Azmier y Khabibor, 2011), (Fonseca y col., 2014), (Fu y Wang, 2011), (Taha et al., 2016).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la tabla 1, se muestran las características físicas del adsorbente, aspecto importante en cuanto a las propiedades físicas, que influyen en el comportamiento químico:

Tabla 1. Parámetros físicos del adsorbente

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Unidades</i>
Tamaño de partícula (mm)	0,2
Densidad aparente (g/cm^3)	$0,17 \pm 0,070$
Densidad aparente por aprisionamiento (g/cm^3)	$0,24 \pm 0,046$
Densidad picnométrica (g/cm^3)	$0,43 \pm 0,028$
Velocidad de flujo (mg/s)	0
Porosidad (%)	$61 \pm 0,75$
Compresibilidad (%)	$50 \pm 0,030$
Superficie específica (m^2/g)	$289 \pm 0,52$

Además la tortuosidad del polvo es de 1,8, el factor de forma es de 0,5. La muestra de

cedro tiene un pH de 6,9.

Desde el punto de vista físico, es un material de origen vegetal de baja densidad, gran porosidad, lo que justifica su nula velocidad de flujo. Su compresibilidad es elevada. Presenta una superficie específica baja en comparación con algunos carbones, pero alta con respecto a arcillas, zeolitas y sólidos amorfos.

Las partículas presentan una elevada tortuosidad, lo cual condiciona la superficie específica que presenta. El factor de forma brinda una idea de lo alejada que esta la morfología de grano de una esfera. El pH de la muestra puede estar condicionado por los derivados orgánicos presentes en la estructura.

Los bioadsorbentes son materiales porosos constituidos principalmente por carbono, sin embargo invariablemente junto a esta presencia mayoritaria de carbono, siempre está presente un importante contenido de oxígeno e hidrógeno, a la forma de diferentes tipos de grupos funcionales superficiales. Además de los elementos anteriores, se presenta aunque en menores cantidades, nitrógeno, hidrógeno y una variable composición en contenido de metales (cenizas). Por lo anterior es que la caracterización química de un bioadsorbente debe necesariamente considerar el análisis elemental y además de un análisis de sus cenizas con el fin de detectar la presencia de los metales más abundantes en el material. En la tabla 2 se muestran algunos parámetros químicos del adsorbente.

Tabla 2. Parámetros químicos del adsorbente

<i>Parámetros químicos</i>	<i>Valores</i>
Carbón fijo (%)	15,38 ± 0,080
Humedad (%)	11,3± 0,038
Volátiles (%)	72,3± 0,054
Cenizas (%)	1,02± 0,021
Sodio (mg/g)	0,08± 0,010
Potasio (mg/g)	1,7± 0,18
Calcio (mg/g)	0,9± 0,016
Magnesio(mg/g)	0,2± 0,018

3.1. Resultados del estudio cinético

A continuación se muestra la figura 1 donde se establece la dependencia de la concentración de iones Ni²⁺ (mg/L) vs. tiempo (min).

Se puede apreciar en el gráfico que las mejores condiciones para la adsorción son a 25°C y que se hace mínima a los 45°C. En la tabla 3 se expresan los coeficientes de determinación para los modelos cinéticos y difusivos empleados.

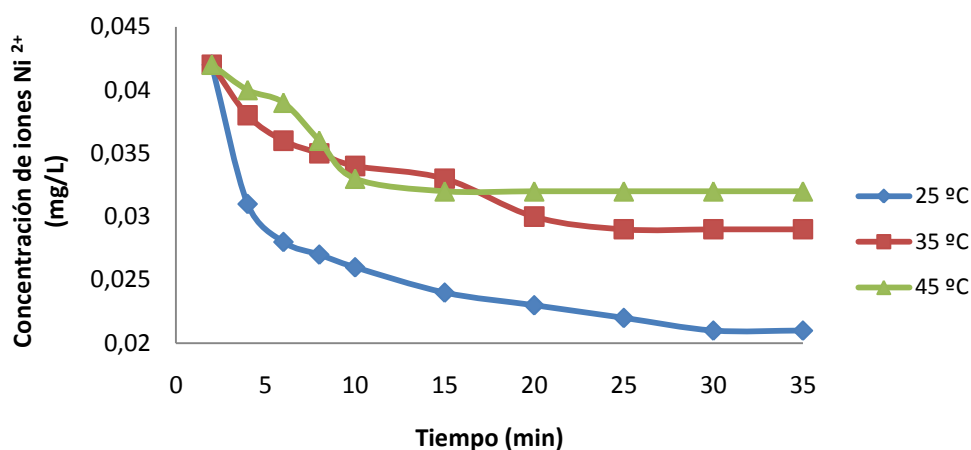


Figura 1. Dependencia de Concentración de iones Ni²⁺ vs. tiempo (min)

Tabla 3. Coeficientes de determinación de los modelos cinéticos empleados

Temperatura (°C)	SPO	SSO	ME	DIP	DPL	MB
25	0,939	0,875	0,895	0,946	0,844	0,922
35	0,980	0,914	0,896	0,945	0,879	0,922
45	0,947	0,151	0,936	0,977	0,992	0,994

Donde:

SPO: Seudoprimer orden, SO: Seudosegundo orden, ME: Mecanismo de Elovich, DIP: Difusión intrapartícula, DPL: Difusión en la película de líquido, MB: Mecanismo de Bangham

Se aprecia que el modelo cinético que mejor se ajusta es el de seudoprimer orden. Esto se puede considerar como si el ion Ni²⁺ interactuara con un punto del adsorbente. A partir de los valores de la constante "aparente" específica de velocidad de adsorción (k_{ads}) para las temperaturas de 25, 35 y 45°C respectivamente: 0,276, 0,118 y 0,104 min⁻¹ se puede establecer la dependencia $\ln k_{ads}$ vs $1/T$ y obtener el valor $E_a = 38,4$ kJ/mol, con un valor del factor preexponencial de $1,1 \cdot 10^7$ min⁻¹. Este valor bajo de la energía de activación refleja un proceso de adsorción de naturaleza física.

Al establecer la dependencia $\ln C_e$ vs $1/T$ se determina el calor isostérico cuyo valor de 8,2 kJ/mol, demuestra su poca relevancia, lo cual responde a la baja heterogeneidad energética superficial. Los valores de los tiempos de vida media para los procesos a 45, 35 y 25°C son 6,66, 5,87 y 2,51 minutos. Todo ello refleja cómo el proceso de adsorción está favorecido a 25°C.

Es de destacar que a 45°C el modelo de Elovich presenta un coeficiente de determinación elevado en comparación con los procesos a menor temperatura, lo cual puede estar condicionado por procesos químicos de adsorción condicionados por la alta temperatura. La difusión intrapartícula presenta elevados valores de los coeficientes de determinación a las tres temperaturas. Como mecanismo difusivo del proceso permitirá obtener los coeficientes de difusión a las diferentes temperaturas, el valor del factor preexponencial del proceso difusivo y su energía de activación.

La difusión en la película de líquido no es de consideración para las temperaturas de 25 y 35°C pero no es despreciable a 45°C, donde el aumento de temperatura condiciona

una mayor movilidad de los iones y por tanto una mayor influencia en la película de líquido que cubre el grano de adsorbente. Por último, llama la atención los coeficientes de determinación del mecanismo de Bangham por sus valores apreciables, lo cual permite especular sobre el papel de los microporos en el proceso difusivo de los iones Ni^{2+} en la matriz sólida del grano del adsorbente. A partir de la ecuación 2 es posible obtener la variación de entalpía y entropía de adsorción.

$$\ln K = -\frac{\Delta H_{ads}}{RT} + \frac{\Delta S_{ads}}{R} \quad (2)$$

Donde:

K: constante de equilibrio (adimensional), ΔH_{ads} : Variación de entalpía (J/mol), ΔS_{ads} : Variación de entropía (J/(mol.K)), R: Constante universal de los gases (8,3144 J/(mol. K)), T: Temperatura (K).

Es preciso conocer la relación $K = q_e/C_e$ donde K es la constante de equilibrio, q_e la capacidad de adsorción (mg/g) y C_e la concentración de equilibrio (mg/L) para cada temperatura, lo cual se muestra en la tabla 4. Ver figura 2.

Tabla 4. Constantes de equilibrio a diferentes temperaturas

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	q_e (mg/g)	C_e (mg/L)	K
25	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,094
35	$1,50 \cdot 10^{-3}$	0,030	0,050
45	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,032	0,039

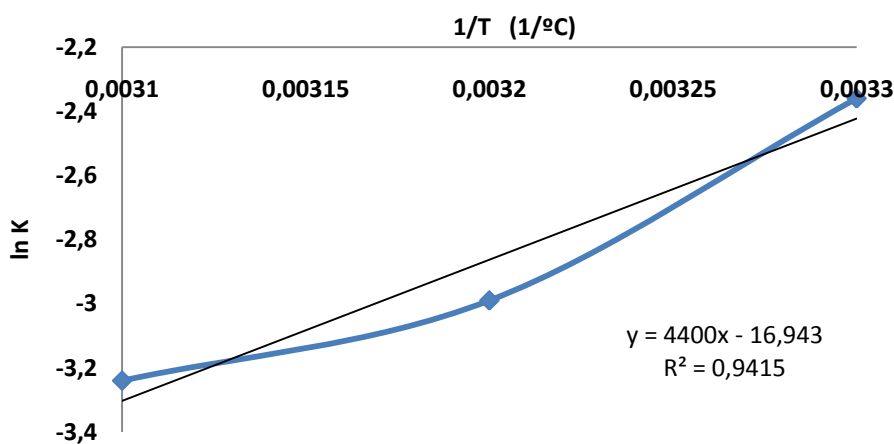


Figura 2. Relación entre las constantes de equilibrio y el inverso de las temperaturas (ln K vs 1/T)

El empleo de la ecuación 2 permite obtener los valores:

$$\Delta H_{ads} = -36,6 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S_{ads} = -0,14 \text{ kJ/(mol} \cdot \text{K)}$$

El proceso de adsorción trae aparejado una liberación de energía y a una disminución de la aleatoriedad del sistema adsorbente/adsorbato. Al establecer la relación 3:

$$\Delta G_{ads} = -R T \ln K \quad (3)$$

Donde:

R: Constante universal de los gases 8,314 J/(mol.K), T: Temperatura (K).

Se obtienen los valores mostrados en la tabla 5 para la variación de energía libre de adsorción.

Tabla 5. Valores de ΔG_{ads} a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	ΔG_{ads} (kJ/mol)
25	5,8
35	7,7
45	8,6

A partir de los valores de variación de entalpía, entropía y energía libre de adsorción se puede afirmar que el proceso es posible a bajas temperaturas.

Al aplicar el modelo rotacional es posible obtener el coeficiente de difusión del proceso a las tres temperaturas estudiadas.

El proceso difusivo está regido por la diferencia de los potenciales químicos. Lo anterior puede ser hallado por la ecuación 4:

$$C_f/C_i = k e^{-\Delta\mu^0/RT} \tag{4}$$

donde:

C_f/C_i : Relación de la concentración final e inicial a cada temperatura, K: Constante de proporcionalidad (adimensional), $\Delta\mu^0$: Diferencia de potenciales químicos (J/mol), R: Constante de los gases 8,314 J/(mol. K), T: Temperatura (K). Ver tabla 6.

Tabla 6. Relación entre $\ln C_f/C_i$ vs $1/T$

$\ln C_f/C_i$	$1/T$
-0,56	$3,35 \cdot 10^{-3}$
-0,34	$3,25 \cdot 10^{-3}$
-0,27	$3,14 \cdot 10^{-3}$

A continuación en la figura 3 se muestra la dependencia de $\ln C_f/C_i$ vs $1/T$. A partir de la pendiente se establece el valor de $\Delta\mu^0 = 11,37$ kJ/mol, el cual demuestra que el proceso de difusión está favorecido.

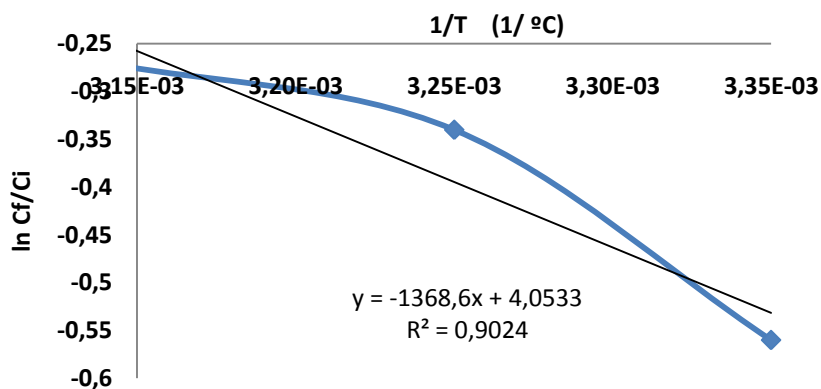


Figura 3. Relación $\ln C_f/C_i$ vs $1/T$

Otro aspecto a considerar es la determinación del coeficiente de difusión efectivo, como se muestra en la tabla 7, muy vinculado a la morfología de grano del bioadsorbente.

Tabla 7. Coeficientes de difusión a las temperaturas de estudio

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>D (m²/s)</i>
25	1,1•10 ⁻¹⁶
35	9,0•10 ⁻¹⁷
45	5,2•10 ⁻¹⁷

Es apreciable como un aumento de temperatura provoca una disminución de la difusión en el grano. Lo anterior está relacionado con el aumento de la temperatura en el sistema heterogéneo que provoca dificultades en el traslado de los iones a través de la matriz sólida del adsorbente. A partir de la ecuación 5:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (5)$$

Donde:

D: Coeficiente de difusión efectivo (m²/s), D₀= Factor pre-exponencial (m²/s), Q: Energía de activación del proceso de difusión (kJ/mol), R: 8,314 J/(mol•K), T: Temperatura (K), Es posible obtener:

$$D_0 = 2,6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 26,4 \text{ kJ/mol}$$

Lo anterior permite afirmar que se invierte 66,8 % de la energía de activación en el proceso difusivo. Conociendo que la tortuosidad es 1,76 es posible obtener la difusividad teórica o coeficiente de difusión teórico para cada temperatura a través de la ecuación 6. Los resultados se muestran en la tabla 8.

$$D = D_T da/\Gamma \quad (6)$$

Donde:

D_T: Coeficiente de difusión teórico (m²/s), da: densidad aparente por aprisionamiento (g/mL), Γ: Tortuosidad (adimensional).

Tabla 8: Coeficientes de difusión teóricos a las temperaturas de estudio

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>D (m²/s)</i>
25	1,1•10 ⁻¹⁵
35	9,3•10 ⁻¹⁶
45	5,4•10 ⁻¹⁶

Se aprecia como la difusión teórica es mayor que la efectiva a las temperaturas de trabajo. Las diferencias entre las difusividades teóricas y efectivas son de 9,9•10⁻¹⁶, 8,4•10⁻¹⁶ y 4,9•10⁻¹⁶ m²/s a las tres temperaturas de estudio.

4. CONCLUSIONES

- 1- Desde el punto de vista físico el serrín de cedro es un material de origen vegetal de baja densidad, gran porosidad, lo que justifica su nula velocidad de flujo. Su compresibilidad es elevada. Presenta una superficie específica baja.

- 2- A partir de los valores de k_{ads} para las temperaturas de 25, 35 y 45°C respectivamente: 0,276, 0,118 y 0,104 min^{-1} se puede establecer la dependencia $\ln k_{ads}$ vs $1/T$ y obtener el valor $E_a = 38,4$ kJ/mol, con un valor del factor preexponencial de $1,1 \cdot 10^7$ min^{-1} , refrendando un proceso de naturaleza física.
- 3- El proceso de adsorción de iones Ni^{2+} presenta valores negativos de variación de entropía y entalpía, no así de energía libre, lo que condiciona que el mismo pueda ocurrir a bajas temperaturas.
- 4- El proceso de adsorción de iones Ni^{2+} posee bajo calor isostérico (8,2 kJ/mol) involucrado.
- 5- El proceso difusivo consume el 66,8% de la energía de activación del proceso.

REFERENCIAS

- ATSDR., Resumen de Salud Pública, Níquel., Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Atlanta, GA, 2005.
- Azmier, A.M., & Khabibor, R.N., Equilibrium, kinetics and thermodynamic of Remazol Brilliant Orange 3R dye adsorption on coffee husk-based activated carbon., *Chemical Engineering Journal*, Vol. 170, No. 1, 2011, pp. 154–161.
- Duygu, H., & Kumbur, H., Adsorption of Cu (II) ion son cotton boll., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 136, No. 3, 2006, pp. 911-916
- Ejikeme, P.M., Okoye, A.I., & Onukwuli, O.D., Kinetics and isotherm studies of Cu (II) and Pb (II) ions removal from simulated waste water by Gambeya albida seed shell activated carbon., *The African Review of Physics*, Vol. 6, No. 6, 2011, pp. 17-22.
- Eyring, H., Walter, J., & Kimball, G., *Quantum Chemistry.*, Chapter 16, John Wiley and Sons, New York, 1949, pp. 210-219.
- Fonseca, R.A., Giraldo, L., & Moreno, P.J., Estudio cinético de la adsorción de Ni^{2+} desde solución acuosa sobre carbones activados obtenidos de residuos de tuza de maíz (*Zea mays*)., *Afinidad*, Vol. 71, No. 567, 2014, pp. 207-213.
- Fu, F., & Wang, Q., Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review., *Journal of Environmental Management*, Vol. 92, No. 3, 2011, pp. 407–418.
- Larenas, C., Andrango, D., & Ingla, P., Estudio isotérmico de bioadsorción de plomo en aguas utilizando residuos vegetales., *La granja, Revista de Ciencias de la vida*, Vol. 8, No. 2, 2008, pp. 3-8.
- Ostle, B., *Estadística Aplicada.*, Editorial Científico Técnica, La Habana, Cuba, 1974, pp. 63-84.
- Ponjuan, A., Blanco, J., y Novoa J., *Química Inorgánica.*, Tomo II, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1979, pp. 234-246.
- Prieto, J.O., Castillo, D., Rodríguez, E., y Mollineda, A., Adsorción de iones Uranilo en ceniza de bagazo de caña de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 46, No. 2, 2019a, pp. 11-20.
- Prieto, J.O., Aguilera, D.M., Curbelo, A., Broche, M.H., y Mollineda, A., Estudio cinético y termodinámico de la adsorción de Plomo (II) en ceniza de bagazo de caña de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 46, No. 3, 2019b, pp. 1-10.
- Prieto, J.O., Quintana, R., Curbelo, A., Alujas, A., Rodríguez, J., Cruz, Y., y Mollineda, A., Diffusivity of Cd (II) Ions in Several Adsorbents., *Proceeding of the second*

International Conference on BioGeoSciences, (Modelig Natural Environments) Editorial Springer, 2019c, pp. 147-158.

Prieto, J.O., Gehan, N., Pérez, A., Martínez, E., y Enríquez, M., Adsorción de Cadmio desde soluciones acuosas en carbón activado de bagazo de caña de azúcar variedad Roxa., Centro Azúcar, Vol. 47, No. 1, 2020, pp. 90-99.

Resumen de Salud Pública., Níquel., Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EEUU, Servicios de Salud Pública, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2005.

Taha, A.A., Shreadah, M.A., Ahmed, A.M., & Heiba, H.F., Multi-component adsorption of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) onto Egyptian Na-activated bentonite; equilibrium, kinetics, thermodynamics, and application for seawater desalination., Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 1166–1180.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Julio Omar Prieto García. Desarrolló las corridas experimentales a nivel de laboratorio, así como la escritura y corrección del artículo.
- Lic. Ariel Pérez Leiva. Desarrolló la búsqueda bibliográfica.
- Dr.C. Alfredo E. Curbelo Sánchez. Trabajó en la redacción y corrección del artículo.
- Técn. Mixary Enríquez García. Desarrolló las corridas experimentales a nivel de laboratorio.