

Empleo de ceniza de bagazo de caña como un material adsorbente de bajo de costo en la eliminación de iones Ni (II)

Vagazo employing cane ash as an adsorbent material of low cost in removing ions(II)

Joan Manuel. Rodríguez-Díaz^a; Luis Ramón Bravo-Sánchez^b; Julio Omar Prieto-García^b; Gustavo Henrique Bezerra-da Silva^d; Angel Mollineda-Trujillo^b; Meuris Gurgel-Carlos da Silva^c; Valdinete Lins-da Silva^{d,*}

^{a,*} Departamento de Química Fundamental, Universidade Federal de Pernambuco. 50.740-560.

Recife, PE, Brasil. Tel. (+53) 81-21268711. e-mail: joanrd9@yahoo.com

^b Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central de Las Villas, 54830, Santa Clara –VC., Cuba.

^c Facultad de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 13083-970, Campinas, SP, Brasil

^{d,*} Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco. 50.740-560. Recife, PE, Brasil. e-mail: leaq_val@yahoo.com

Resumen

La ceniza de bagazo de caña es un material de desecho generado en la combustión del bagazo usado en la generación de energía para la producción de azúcar y etanol en la industria azucarera brasileña (SBA1) y cubana (SBA2). Cenizas de bagazo de caña provenientes de regiones específicas de cada país han sido probadas como adsorbentes en la eliminación de iones Ni (II). Los adsorbentes se caracterizaron mediante técnicas de Fluorescencia de Rayos –X (FRX), Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) y Difracción de Rayos –X (RX). El estudio cinético mostró que el sistema de equilibrio en la eliminación de los iones de Ni (II) se alcanzó en 40 min. Los valores de la mayor capacidad de sorción obtenidos para SBA1 y SBA2 fueron de 1,21 y 1,80 mg g⁻¹, respectivamente. Los datos cinéticos tuvieron el mejor ajuste al modelo de pseudo-segundo orden. El estudio del proceso de equilibrio permitió llegar a la conclusión de que las isothermas del proceso de eliminación de iones Ni (II) usando SBA1 y SBA2 presentó un mejor ajuste al modelo de Langmuir y Toth.

Palabras Claves: Ceniza de bagazo, caracterización, sorción, níquel

Summary

The sugar cane bagasse fly ash is a waste material generated in bagasse combustion used in energy generation for sugar and ethanol production in Brazilian (SBA1) and Cuban (SBA2) industries. Sugar cane bagasse fly ashes from specific regions in each country have been tested as adsorbent materials in Ni (II) ions removal. The adsorbents were characterized using X-Ray Fluorescence, Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR) and X-Ray Diffraction techniques. The kinetic study showed that the equilibrium system in Ni (II) ions removal was reached in 40 minutes. The maximal adsorption capacity values obtained were 1,21 mg g⁻¹ for SBA1 and 1,80 mg g⁻¹ for SBA2. The kinetic data behavior was of pseudo second order. The equilibrium study allowed concluding that Ni (II) ions removal process isotherms using SBA1 and SBA2 had a better fitting to Langmuir and Toth model.

Key words: Bagasse fly ash, characterization, sorption, nickel

1. Introducción

Los problemas de contaminación de las aguas tienen su origen aproximadamente unos 200 años atrás como consecuencia de la Revolución Industrial y del rápido aumento de la población mundial. La necesidad de controlar la contaminación que provocan los metales pesados debido al desarrollo industrial en las últimas décadas es cada vez más acuciante¹. El níquel es considerado un metal pesado que se encuentra principalmente en forma de óxidos, sulfuros y arseniuros.² Es considerado esencial para el organismo, formando parte de estructuras de enzimas; sin embargo, en concentraciones elevadas puede causar graves problemas a los seres humanos, entre ellos: hemorragia gastrointestinal, cáncer y retraso del crecimiento³. Varios métodos se han empleado para la eliminación del níquel, sin embargo, en la mayor parte de los casos, estos procedimientos, no son totalmente satisfactorios y se necesitan de métodos secundarios para disminuir el contenido total de iones metálicos hasta valores permitidos.^{4,5} En busca de nuevas alternativas y de reducción de costes, en la actualidad se vienen aplicando otros métodos que han demostrado tener alta capacidad de depuración, como son, los procesos sorción, hecho que ha llevado a una amplia investigación por parte de la comunidad científica en la aplicación de nuevos materiales adsorbentes, entre ellos la biomasa y sus derivados.

Las cenizas de bagazo de caña son generadas durante el proceso de combustión del bagazo de la caña de azúcar (biomasa) en las calderas de generación de vapor para cogenerar electricidad y potencia mecánica.⁶ Estas cenizas secas, están compuestas por carbón vegetal y material inorgánico, siendo la sílice (SiO₂) el componente principal⁷. Además de la sílice, contienen óxidos de otros metales.⁸ Debido a estas características en varios estudios realizados por investigadores del continente asiático se han empleado las cenizas de bagazo de caña como un adsorbente de bajo coste para la eliminación de metales pesados.⁹⁻¹³ Los objetivos del presente estudio incluyen (1) la caracterización físico química de las cenizas de bagazo de caña proveniente del estado de Pernambuco, Brasil (SBA1) y de la provincia de Villa Clara, Cuba (SBA2) (2) la determinación del potencial de sorción de las cenizas (SBA1 y SBA2) para la eliminación de los iones Ni(II) en disolución acuosa, (3) el estudio cinético y (4) el estudio de equilibrio del proceso sorción del ion metálico en estudio.

2. Materiales y métodos

2.1. Adsorbentes

Se utilizaron las cenizas de bagazo de caña, procedente de la USINA J.B, ubicada en el municipio de Vitoria de Santo Antão, Pernambuco, Brasil (SBA1) y las cenizas de bagazo de caña procedentes del CAI "Ifraín Alfonso", ubicado en municipio de Ranchuelo, Villa Clara, Cuba (SBA2).

2.2. Caracterización de los adsorbentes

Se realizó el análisis químico (XRF) usando un instrumento de fluorescencia de rayos-x Rigaku modelo RIX 300 (Japón), equipado con tubo de Rh. La determinación del área superficial de las cenizas, se realizó en un equipamiento BET Gemini III 2375 SurfaceAreaAnalyser de marca Micromeritics (USA). Mediante la técnica de Espectroscopia de Infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) fueron obtenidos

los espectros a través del método de reflectancia difusa, en un equipamiento SpectrumOne – FT-IR Stectrometer – Perkin Elmer (USA), en la región de 4000 a 400 cm^{-1} , con muestras prensada en forma de pastillas de KBr. Además, por Difracción de Rayos – X (RX) se obtuvieron los difractogramas empleando un equipo Philips (Almelo, Netherlands), modelo X'PERT con radiación K α de cobre, tensión de 40KV, corriente de 40mA, longitud de onda 1,542 Å, tamaño de paso de 0,02 2 θ y tiempo por paso de 1,0.

2.3. Experimentos de sorción.

Los experimentos se realizaron poniendo en contacto 1 g de cada ceniza, previamente pesada en un matraz cónico de 25 mL con 100 mL de disolución de Ni (II) de pH conocido, con velocidad de agitación de 200 rpm y temperatura de 26 °C. Las concentraciones iniciales y residuales se determinaron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama (FAAS). La masa de adsorbente utilizada en el proceso de sorción de Ni (II) se determinó variando la concentración de SBA1 y SBA2 entre 0,2 y 3,0 g. El efecto del tiempo de contacto se examinó mediante el estudio cinético con una variación del tiempo entre 1 y 120 min. Para los estudios de la isoterma de adsorción, se varió la concentración inicial del ion metálico en un intervalo de 2 a 100 mg L^{-1} .

La cantidad de ion metálico adsorbido sobre SBA1 y SBA2 se calculó mediante la ecuación (1) y el porcentaje de eliminación mediante la ecuación (2).

$$q_a = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad (1)$$

$$\%_{\text{remoción}} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} 100 \quad (2)$$

Donde, C_o (mg g^{-1}) y C_f (mg g^{-1}) son las concentraciones iniciales y de equilibrio de Ni (II) en disolución; mientras que V (L) y m (mg) son el volumen de disolución y la masa del adsorbente, respectivamente.

3. Resultados y discusión

3.1. Característica físico-químicas de las cenizas

La composición química de SBA1 y SBA2, se obtuvo a través de la Fluorescencia de Rayos – X. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1- Composición físico química de las cenizas.

| Características | SBA1 | SBA2 | Características | SBA1 | SBA2 |
|--------------------------------|-------|-------|--|--------|--------|
| Composición Química(%) | | | Composición Química(%) | | |
| SiO ₂ | 50,40 | 63,20 | TiO ₂ | 1,28 | 0,08 |
| CaO | 18,90 | 9,81 | Na ₂ O | 0,33 | 0,23 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,87 | 1,71 | Cl | 0,59 | 0,32 |
| Al ₂ O ₃ | 7,48 | 1,37 | Cr ₂ O ₃ | 0,06 | 0,03 |
| P ₂ O ₅ | 2,47 | 5,19 | MnO | 0,23 | 0,43 |
| K ₂ O | 7,29 | 14,00 | Composición Física | | |
| SO ₃ | 1,94 | 1,49 | Área Superficial (m^2/g) | 111,79 | 100,68 |
| MgO | 1,61 | 1,89 | Densidad Real (g/cm^3) | 2,17 | 2,26 |

La Tabla 1 muestra los principales componentes químicos presentes en SBA1 y SBA2. La composición química es variada y su origen puede estar dada, entre otros factores, por la mineralogía del suelo donde fueron sembradas las plantas de caña de azúcar. Los elementos mayoritarios presentes en la estructura

química de SBA1 y SBA2, son: el silicio, calcio, potasio, aluminio y hierro. Los elevados valores de estos tres elementos sugieren que las cenizas tienen características similares a otros adsorbentes, como por ejemplo las zeolitas y las cenizas de carbón mineral. Los valores de densidad real y superficie específica encontrados en el análisis de estos materiales, están en correspondencia con los reportados por otros autores en el empleo de este tipo de material como adsorbente.^{9,14,15}

3.2. Estudio Espectroscopia de Infrarrojos por transformada de Fourier

La Fig. 1 muestra los espectros infrarrojos de SBA1 y SBA2.

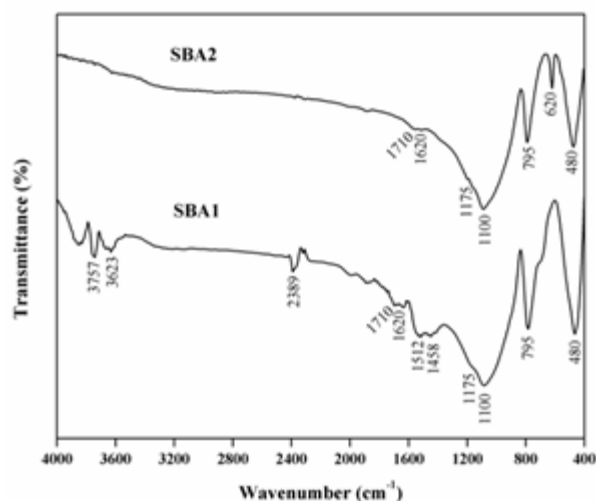


Fig. 1. Espectro FTIR de SBA1 y SBA2

En ambos espectros se aprecia una banda ancha, aunque no muy bien definida, entre los 3100 y 3500 cm^{-1} que indica la presencia tanto de hidrógenos libres como enlazados a grupos OH sobre la superficie del adsorbente.¹¹ Los picos a 3623 y 3757 cm^{-1} en SBA1 pueden estar relacionados a la vibración de grupos (OH). A 1710 cm^{-1} se registra un pico atribuido a los enlaces C=O de los ácidos carboxílicos, banda normalmente encontrada en materiales fibrosos.^{16,17} La banda a 1620 cm^{-1} puede estar relacionada con la presencia de grupos carbonilos de hidrocarburos conjugados. En ambos espectros se registró una banda a 1175 cm^{-1} que puede estar asociada tentativamente a las vibraciones de estiramientos antisimétricas de Si-O-Al.¹⁸ Las bandas en 1100 cm^{-1} y 795 cm^{-1} se corresponden con las vibraciones antisimétricas y simétricas Si-O-Si. La banda a 1100 cm^{-1} también está relacionada con los estiramientos -C-O-H y deformación -OH. El espectro de ambos materiales muestra una banda estrecha a 480 cm^{-1} asignada a la vibración de flexión O-Si-O; a 620 cm^{-1} se registra una banda relacionada con el acoplamiento Si-O. La presencia de grupos polares carboxilos, carbonilos e hidroxilos, presentes en las superficies de SBA1 y SBA2, pueden contribuir a la formación de enlaces con elementos metálico, hecho favorable que las convierte en un potencial material adsorbente. Igualmente características espectrales han sido informadas para materiales sólidos con propiedades similares a las anteriores.^{4,19,20}

3.3. Estudio de la difracción de rayos - X

Los difractogramas de rayos-x (Fig. 2) muestran la cristalinidad de SBA1 y SBA2. El patrón de difracción de rayos-x de SBA2 muestra que la fase predominante del material es la cristobalita. A diferencia de SBA2 el difractograma de rayos-x de SBA1 refleja una mayor mineralogía, con una elevada presencia de cuarzo, reflejado también por otros autores.^{7,21} La calcita y el feldespato, aunque en menor grado, son otras de las fases encontradas en SBA2. La presencia de estas fases en ceniza de bagazo de caña usadas como adsorbente, ha sido registrada en la literatura.^{8,22}

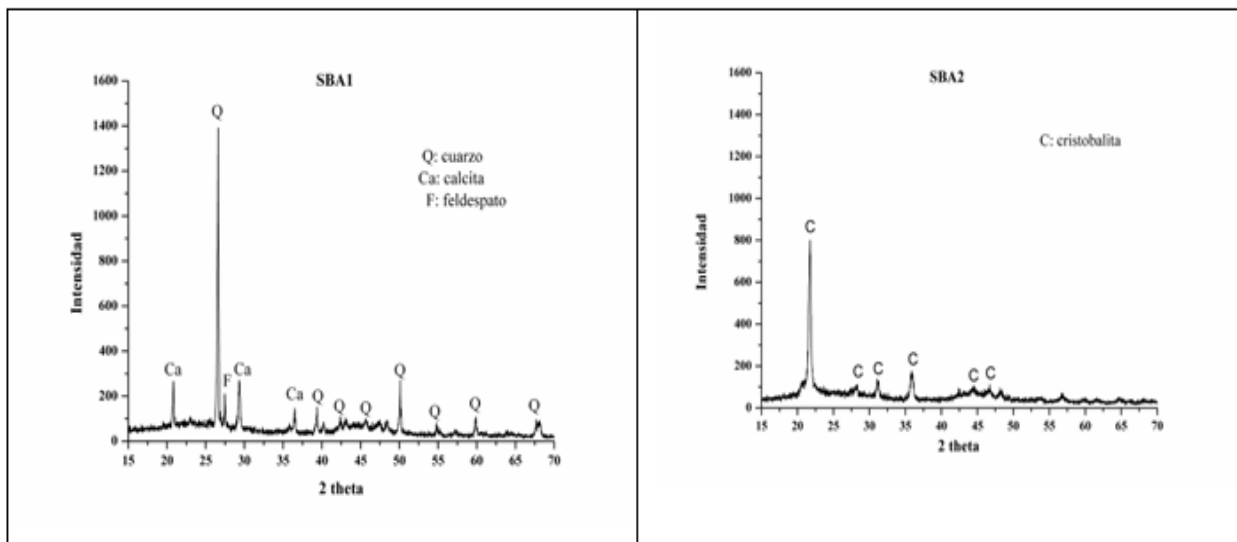


Fig. 2. Difractogramas de Rayos - X de SBA1 y SBA2

3.5. Cinética de sorción

3.5.1. Efecto del tiempo de contacto

El estudio cinético se realizó para cada adsorbente bajo estudio (SBA1 y SBA2) a una concentración inicial de solución de 100 mg L^{-1} y pH del medio igual a 6. El pH del medio fue determinado a partir del análisis de especiación obtenido del programa HIDRA.²³ El análisis de las curvas cinéticas (Fig. 4) del proceso de sorción muestra que la remoción de los iones Ni(II), ocurre a los 40 min. Tiempos semejantes de equilibrios fueron reportados en el empleo de ceniza de bagazo en la remoción de metales.^{24,25}

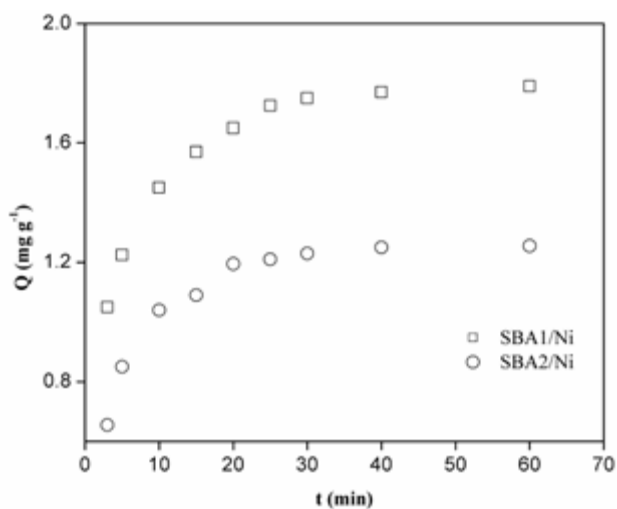


Figura 4. Efecto del tiempo de contacto

En la tabla 2 se muestran los valores de mayor capacidad de sorción y mayores porcentajes de retención alcanzados por SBA1 y SBA2 en el intervalo de concentraciones estudiadas.

Tabla 2– Capacidad de sorción y porcentaje de eliminación

| Sistema | q_s (mg g ⁻¹) | % Remoção |
|---------|-----------------------------|-----------|
| SBA1/Ni | 1,80 | 26,53 |
| SBA2/Ni | 1,21 | 24,67 |

Los resultados obtenidos en la Tabla 2 indican que no existen diferencias significativas en cuanto a la capacidad de remoción y porcentaje de remoción. Los resultados obtenidos están en correspondencia con lo informado por otros autores en la sorción de iones Ni (II).^{3,15}

3.5.2. Modelos cinéticos

Para una mejor comprensión de los mecanismos cinéticos de sorción con el empleo de SBA1 y SBA2, se pasó a realizar con los datos experimentales la prueba de ajuste con los modelos cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden. Los valores de q_e , k_1 , k_2 y r^2 se muestran en la Tabla 3. Los valores de r^2 para el modelo de pseudo segundo orden son los más cercanos a 1 (Tabla 3), por lo que este modelo es el que mejor reproduce los datos experimentales. Por otro lado existe poca diferencia entre los valores de experimentales (q_a) (Tabla 2) y los valores teóricos (q_e) (Tabla 3) obtenidos del modelo de pseudo segundo orden, confirmando la aplicabilidad del modelo. En la Fig. 5 se muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de pseudo segundo orden. El ajuste a este modelo es muy común en los fenómenos de sorción, siendo reportado por varios autores para describir los mecanismos de sorción de metales pesados^{15,19,26}.

Tabla 3. Parámetros de los modelos cinéticos

| Sistema | Pseudo-primeir orden | | | Pseudo-segundo orden | | |
|---------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | q_e | k_1 | R^2 | q_e | K_2 | R^2 |
| SBA1/Ni | 0,384 | 0,083 | 0,852 | 1,871 | 0,209 | 0,990 |
| SBA2/Ni | 0,351 | 0,082 | 0,962 | 1,343 | 0,246 | 0,991 |

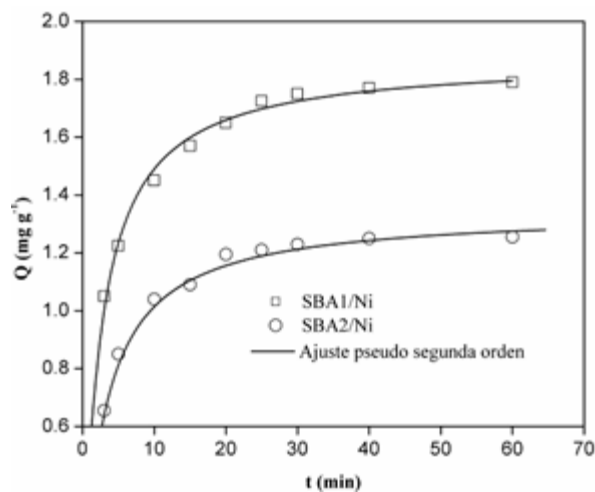


Figura 5. Ajuste cinético del modelo pseudo segundo orden

3.6. Estudio de equilibrio

Aunque son numerosos los modelos que aparecen en la bibliografía para el estudio del equilibrio en los²⁷, los más utilizados son el de Langmuir y el de Freundlich.^{28,29} También existen otros modelos más complejos que ayudan a una mejor comprensión del proceso de equilibrio metal-adsorbente, ejemplo de ellos, es el modelo de Toth.³⁰

Los resultados experimentales obtenidos en el estudio del equilibrio de sorción de los iones Ni (II) se ajustan, mediante regresión no lineal. En las Figuras 6 y 7 se muestran los ajustes de los modelos teóricos SBA1 y SBA2. En la Tabla 4 se muestra los parámetros de ajuste para cada isoterma.

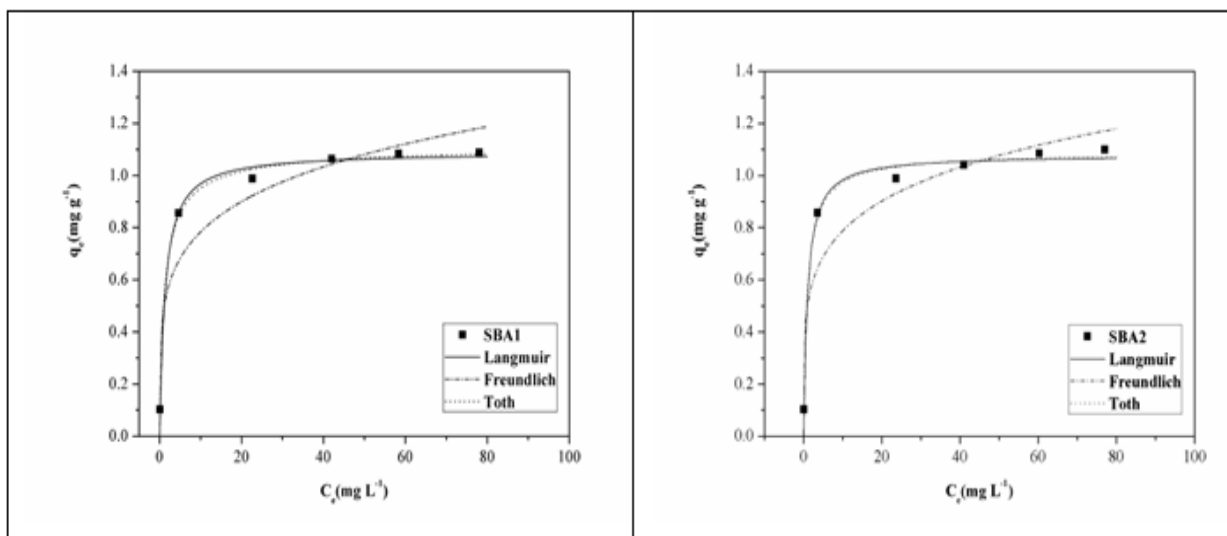


Figura 6. Ajuste de los modelos teóricos en la isoterma de sorción de Ni(II) usando SBA1 y SBA2

Tabla 4. Parámetros de los modelos de equilibrio

| Sistema | Langmuir | | | | Freundlich | | | Toth | | | |
|----------|----------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | q_m | q_s | b | R^2 | K_f | n | R^2 | q_s | K_T | T_h | R^2 |
| SBA1/Ni | 1,098 | 1,087 | 0,858 | 0,993 | 1,088 | 0,804 | 0,895 | 1,118 | 0,825 | 0,783 | 0,997 |
| SBA2 /Ni | 1,048 | 1,038 | 1,030 | 0,994 | 0,505 | 5,166 | 0,862 | 1,051 | 0,808 | 0,882 | 0,994 |

A partir de los coeficientes de correlación (R^2) obtenidos de los ajustes a los datos experimentales de equilibrio (Tabla 4), los modelos que presentan un mejor ajuste son los descritos por Langmuir y Toth (Figura 6 y 7). La aproximación entre los valores de capacidad de adsorción (q_m) obtenidos a través del ajuste del modelo de Langmuir, a los valores de capacidad sorción obtenidos experimentalmente (q_e) para ambos sistemas, es otro de los criterios a tener en cuenta para un buen ajuste a este modelo. La misma evidencia se manifiesta en el modelo de Toth donde los valores de capacidad de adsorción obtenido del ajuste de este modelo son muy cercanos a los valores de q_e . El modelo de Toth es derivado del modelo de Lagmuir, que a partir de la inclusión de la constante adimensional T_h , se puede tener una mejor comprensión sobre la heterogeneidad del adsorbente ($T_h \ll 1$). En la Tabla 4 se muestra que para ambos sistema esta constante adimensional es diferente de la unidad. El buen ajuste a ambos modelo ha sido aplicado por diversos autores en el estudio de la sorción de Ni (II) en materiales heterogéneos con resultados positivos de ajuste^{3-5,11}.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la caracterización físico-química realizada y comparadas con las características de otras cenizas de bagazo de caña reportadas en la literatura procedentes del continente asiático, SAB1 y SBA2 se presentan como potenciales adsorbente en la remoción de iones Ni(II). El potencial como adsorbente de ambos materiales es corroborado mediante el estudio de remoción, obteniéndose valores de mayor capacidad de sorción y porcentaje de retención para SBA1 y SBA2 de ($1,80 \text{ mg g}^{-1}$; 26,53 %) y ($1,80 \text{ mg g}^{-1}$; 24,67 %). Los estudios cinéticos revelaron que los procesos de sorción siguen el modelo cinético de pseudo-segundo orden. Los modelos de Lagmuir y Toth presentaron los mejores ajustes a los datos de experimentales. Basado en todos los resultados, SAB1 y SBA2 pueden utilizarse como sorbentes alternativos de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales que contienen iones Ni (II).

5. Agradecimientos

Los autores agradecen por el apoyo financiero y de instalación a FACEPE, CNPq CAPES y UNICAMP.

6. Bibliografía

- (1) Barreto, S. R. G.; Barreto, W. J.; Deduch, E. M.: Determination of Partition Coefficients of Metals in Natural Tropical Water. *Clean-Soil Air Water* 2011, 39, 362-367.
- (2) Duffus, J. H.: "Heavy metals" - A meaningless term? (vol 74, pg 793, 2002). *Pure Appl. Chem.* 2003, 75, 1357-1357.
- (3) Aloma, I.; Martin-Lara, M. A.; Rodriguez, I. L.; Blazquez, G.; Calero, M.: Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions by biosorption on sugarcane bagasse. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2012, 43, 275-281.
- (4) Reddy, D. H. K.; Ramana, D. K. V.; Seshaiyah, K.; Reddy, A. V. R.: Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. *Desalination* 2011, 268, 150-157.
- (5) Bermudez, Y. G.; Rico, I. L. R.; Bermudez, O. G.; Guibal, E.: Nickel biosorption using *Gracilaria caudata* and *Sargassum muticum*. *Chem. Eng. J. (Lausanne)* 2011, 166, 122-131.
- (6) Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R.: Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 2009, 23, 3301-3303.
- (7) Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. M. R.: Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites* 2008, 30, 410-418.
- (8) Umamaheswaran, K.; Batra, V. S.: Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes. *Fuel* 2008, 87, 628-638.
- (9) Gupta, V. K.; Ali, I.: Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *J. Colloid Interface Sci.* 2004, 271, 321-328.
- (10) Srivastava, V. C.; Mall, I. D.; Mishra, I. M.: Equilibrium modelling of single and binary adsorption of cadmium and nickel onto bagasse fly ash. *Chem. Eng. J. (Lausanne)* 2006, 117, 79-91.
- (11) Srivastava, V. C.; Mall, I. D.; Mishra, I. M.: Adsorption thermodynamics and isosteric heat of adsorption of toxic metal ions onto bagasse fly ash (BFA) and rice husk ash (RHA). *Chem. Eng. J. (Lausanne)* 2007, 132, 267-278.
- (12) Taha, G. M.: Utilization of Low-Cost Waste Material Bagasse Fly Ash in Removing of Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺, and Cr³⁺ from Industrial Waste Water. *Ground Water Monitoring & Remediation* 2006, 26, 137-141.
- (13) Wasewar, K. L.; Prasad, B.; Gulipalli, S.: Adsorption of Selenium Using Bagasse Fly Ash. *CLEAN – Soil, Air, Water* 2009, 37, 534-543.
- (14) Gupta, V. K.; Jain, C. K.; Ali, I.; Chandra, S.; Agarwal, S.: Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *Water Res.* 2002, 36, 2483-2490.
- (15) Gupta, V. K.; Jain, C. K.; Ali, I.; Sharma, M.; Saini, V. K.: Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *Water Res.* 2003, 37, 4038-4044.
- (16) Jacques, R. A.; Lima, E. C.; Dias, S. L. P.; Mazzocato, A. C.; Pavan, F. A.: Yellow passion-fruit shell as biosorbent to remove Cr(III) and Pb(II) from aqueous solution. *Separation and Purification Technology* 2007, 57, 193-198.
- (17) Krishnani, K. K.; Meng, X.; Christodoulatos, C.; Boddu, V. M.: Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *J. Hazard. Mater.* 2008, 153, 1222-1234.
- (18) Mollah, M. Y. A.; Promreuk, S.; Schennach, R.; Cocke, D. L.; Güler, R.: Cristobalite formation from thermal treatment of Texas lignite fly ash. *Fuel* 1999, 78, 1277-1282.
- (19) Srivastava, V. C.; Mall, I. D.; Mishra, I. M.: Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption kinetics of metal ions from aqueous solution onto RHA. *J. Hazard. Mater.* 2006, 134, 257-267.
- (20) Lataye, D. H.; Mishra, I. M.; Mall, I. D.: Adsorption of 2-picoline onto bagasse fly ash from aqueous solution. *Chem. Eng. J. (Lausanne)* 2008, 138, 35-46.
- (21) Frías, M.; Villar, E.; Savastano, H.: Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry

- as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites* 2011, 33, 490-496.
- (22) Ruangchuay, S.; Rachakornkij, M.; Grisdanurak, N.: UTILIZATION OF BAGASSE AND BAGASSE FLY ASH WASTES FOR LEAD REMOVAL. *The Journal of Solid Technology and Management* 2007, 33.
- (23) Puigdomenech, I.: HYDRA: Hydrochemical equilibrium-constant database. 18Feb2004 ed.; Royal Institute of Technology: Estocolmo, 2004; pp Inorganic Chemistry Software.
- (24) Rao, M.; Parwate, A. V.; Bhole, A. G.: Removal of Cr⁶⁺ and Ni²⁺ from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste Management* 2002, 22, 821-830.
- (25) Ozturk, A.; Artan, T.; Ayar, A.: Biosorption of nickel(II) and copper(II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3(2). *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces* 2004, 34, 105-111.
- (26) Ho, Y. S.; Ng, J. C. Y.; McKay, G.: REMOVAL OF LEAD(II) FROM EFFLUENTS BY SORPTION ON PEAT USING SECOND-ORDER KINETICS. *Sep. Sci. Technol.* 2001, 36, 241-261.
- (27) Volesky, B.: Biosorption process simulation tools. *Hydrometallurgy* 2003, 71, 179-190.
- (28) Langmuir, I.: THE CONSTITUTION AND FUNDAMENTAL PROPERTIES OF SOLIDS AND LIQUIDS. PART I. SOLIDS. *J. Am. Chem. Soc.* 1916, 38, 2221-2295.
- (29) Freundlich, H. M. F.: Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 1906, 57, 385-470.
- (30) Toth, J.: State equations of the solid gas interface layer. *Acta Chimica Academiae Scientiarum Hungaricae* 1971, 69, 311-328.