Vol.42, no. 3, sep.-dic.

Tecnología Química

Artículo original

Equilibrio y modelos cinéticos en la adsorción de azul de metileno sobre residuos agroindustriales

Equilibrium and kinetic models in the adsorption of methylene blue on agro-industrial wastes

Maria Hertha Broche-Galindo [1] http://orcid/0000-0001-6380-8750
Iván Leandro Rodríguez-Rico [1]http://orcid/0000-0003-1295-5368
Maira Maria Pérez- Villar [2] http://orcid/0000-0002-3907-7449
Julio Omar Prieto-García[3] http://orcid/0000-0002-9279-4412

[1] Departamento Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia, Santiago de Cuba, Cuba
[2]Centro de Estudios de Química Aplicada (CEQA).
[3] Departamento Licenciatura en Química.

*Autor para la correspondencia. Correo: mariah@uclv.edu.cu

RESUMEN

La adsorción es uno de los procesos que se pueden emplear en las industrias para reducir la presencia de contaminantes en sus efluentes, la sustitución del carbón activado por residuos sólidos agroindustriales ha sido explorada, mostrando alta eficiencia en la eliminación de estos compuestos. Para el escalado de este proceso se requieren modelos cinéticos y de equilibrio para cada pareja adsorbato-adsorbente. En este trabajo se evaluaron el equilibrio y la cinética para residuos agrícolas de sorgo-azul de metileno y bagazo de caña de azúcar-azul de metileno en sistema discontinuo con concentración de biomasa de 10 g/L,

agitación de 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 - 0,63) mm a tres temperaturas diferentes. Los modelos de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich fueron seleccionados para la representación de las isotermas y los de pseudo primer orden, pseudo segundo orden, Elovich y difusión intraparticular para la cinética del proceso. El modelo de Temkin presentó el mejor ajuste a las isotermas, mientras la cinética de adsorción fue mejor descrita por el modelo Pseudo segundo orden, considerando los criterios de coeficiente de correlación y errores estadísticos: suma de cuadrados del error y error relativo promedio. Estos resultados indican que la adsorción es favorable y ocurre mediante quimisorción.
Palabras clave: isotermas de adsorción cinética; azul de metileno; sistema discontinuo.

ABSTRACT

Adsorption is one of the processes that can be used in industries to reduce the presence of pollutants in their effluents; the substitution of activated carbon by agro-industrial solid wastes has been explored, showing high efficiency in the removal of these compounds. To scale up this process, kinetic and equilibrium models are required for each adsorbate-adsorbent pair. In this work, equilibrium and kinetics were evaluated for sorghum-methylene blue and sugarcane bagasse-methylene blue agricultural residues in batch system with biomass concentration of 10 g/L, agitation of 80 rpm, pH of 5,5 u and particle size (0,35 – 0,63) mm at three different temperatures. The Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich models were selected for isotherm representation and the pseudo first order, pseudo second order, Elovich and intraparticle diffusion models for process kinetics. The Temkin model presented the best fit to the isotherms, while the adsorption kinetics was best described by the Pseudo second order model, considering the criteria of correlation coefficient and statistical errors: sum of squares of the error and average relative error. These results indicate that adsorption is favorable and occurs by chemisorption.
Keywords: adsorption isotherms; kinetics; methylene blue; batch system.

Recibido: 10/04/2022
Aceptado: 18/07/2022

Introducción

La descarga de efluentes industriales coloreados incide en la contaminación de las fuentes de agua, se manifiesta con afectaciones, a la biota acuática, [1, 2] al deterioro visual del entorno,[3] y los productos de su degradación pueden tener características carcinogénicas y toxicas.[4, 5] Se estima que una producción anual de $7x10^5$a $1x10^6$ toneladas.[6] Se utilizan en procesos textiles, de papel, cuero, plásticos, alimentos, medicamentos, cosméticos.[5, 7] Son difíciles de decolorar debido a su compleja estructura y a su origen sintético.[8]

El azul de metileno, es un colorante de naturaleza catiónica, utilizado principalmente en la tinción de algodón, madera y seda.[4] Es considerado un compuesto con efectos secundarios perjudiciales para la salud, dada sus características de toxicidad debido a que incrementa el ritmo cardíaco, produce alteraciones gástricas y nerviosas, así como también puede inducir la aparición de enfermedades cutáneas como la cianosis e ictericia.[3]

Diversos tratamientos han sido aplicados para la remoción de color de las aguas residuales: degradación fotocatalítica, coagulación y floculación, separación con membranas y degradación electroquímica, limitándose su uso a gran escala debido a su alto costo.[7] La adsorción, es una opción de tratamiento que, separa sustancias al poner en contacto un fluido con un sólido adsorbente, este es un fenómeno mediante el cual el adsorbato queda retenido en la superficie exterior y en los poros interiores del sólido, [6] con los adsorbentes convencionales, como el carbón activado se presenta la desventaja del alto costo.

En los últimos años se ha divulgado la adsorción de azul de metileno utilizando adsorbentes de bajo costo como residuos de agricultura, desechos sólidos industriales, entre los que se encuentra bagazo de Agave salmiana, sorgo y

avena,[8] cascarillas de arroz,[3] biomasa cáscara de yuca (Manihotesculenta) modificada químicamente con ácido oxálico,[9] también se reporta paja de sorgo para eliminación de cromo VI [10] y de bagazo de caña y cáscara de cacaopara remover plomo y cadmio de aguas residuales mineras.[11]

La identificación de los diferentes mecanismos de adsorción que ocurren durante la remoción de azul de metileno en disolución acuosa con residuos agrícolas de sorgo y bagazo de caña de azúcar es propósito de esta investigación que presenta el equilibrio y estudio cinético correspondiente a esos sistemas. Se muestran los modelos de mejor ajuste considerando los coeficientes de correlación, R^2, suma de cuadrados del error (SSE) y error relativo promedio (ARE).

Materiales y métodos

Preparación del adsorbato

La solución patrón de azul de metileno se prepara a una concentración másica de 1 g/L. A partir de ella se hacen las diluciones volumétricas, para los diferentes análisis. Se realizaun barrido de exploración de 320 nm a 700 nm para escoger la longitud de onda de máxima de absorción mediante espectroscopiaUV-Vis, empleando espectrofotómetro marca Rayleígh VIS-7236 UV-Vis, China.

Preparación de la biomasa

Los residuos agrícolas de sorgo (RAS) se obtienen de los cultivos de campesino del municipio de Santa Clara y fueron recolectados días posteriores a la cosecha; mientras que el bagazo de caña de azúcar (BCA) procede de productores del municipio Cruces.

La preparación se inicia con la molienda, empleando un molino MF10 Basic, Alemania; seguida de tamizado, en tamiz Marui con tamices de diámetros de 2 mm; 1 mm; 0,84 mm; 0,63 mm; 0,355 mm; posteriormente se lavan con abundante agua para eliminar impurezas y sus fracciones solubles; continua el secado (estufa Binder, Alemania) a temperatura de 50 °C por 48 h.

Estudio de equilibrio

Este análisis se lleva a cabo estableciendo isotermas a tres temperaturas diferentes para cada biosorbente, con la relación biomasa solución de 10 g/L en diferentes soluciones de azul de metileno desde 10 mg/L hasta 100 mg/L, manteniendo agitación constante en 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 - 0,63) mm. Transcurrida 1 h, tiempo establecido para el estudio, se calcula la cantidad de colorante adsorbida en el tiempo, (q_t)mediante la ecuación 1. Los modelos de isotermas de adsorción seleccionados para interpretar el proceso fisicoquímico fueron Langmuir, Freundlich; [2,9,12] Temkin y Dubinin-Radushkevich.[13] En la tabla 1 aparecen las ecuaciones que los representan (ecuaciones 2, 3, 4 y 6), y suforma lineal (ecuaciones 8, 9, 10, y 11).

$$q_t = \frac{(C_i - C_e)}{m} * V \quad (1)$$

donde:

q_t, es la cantidad de AM retenido por unidad de masa de adsorbente, mg/g

Ci y C_e, representan la concentración inicial y concentración equilibrio respectivamente, mg/L

m, es la masa de adsorbente, g

V,simboliza el volumen de la solución, L.

Tabla 1- Modelos de isotermas con ecuaciones para modelos y su representación lineal

Modelo de isoterma	Ecuación del modelo	Ecuación linealizada
Langmuir	$q_e = \frac{q_{máx} * b * C_e}{1 + b * C_e}$ (2)	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b * q_{máx}} + \frac{C_e}{q_{máx}}$ (8)
Freundlich	$q_e = K_F * C_e^{\frac{1}{n}}$ (3)	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} * \log C_e$ (9)
Temkin	$q_e = B * \ln A_T C_e$ (4) $B = \frac{R * T}{b_T}$ (5)	$q_e = B * \ln(A_T) + B \ln C_e$ (10)
Dubinin-Radushkevich	$q = q_{máx} * e^{(-\beta \varepsilon^2)}$ (6) $\varepsilon = RT * \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right)$ (7)	$\ln q_e = \ln q_{máx} - \beta * \varepsilon^2$ (11)

donde:

q_e, es el equilibrio alcanzado del adsorbato en el adsorbente, mg/g

q_{max}, es la máxima capacidad de adsorción, mg/g

C_e, es la adsorción en equilibrio del adsorbato en solución, mg/L

b, energía relativa de adsorción, L/mg

K_F, capacidad de adsorción, (mg/g)*(L/mg) $^{1/n}$

n, intensidad de adsorción

A_t, es la constante de equilibrio de la isoterma de Temkin, L/g

B, es la constante relacionada con el calor de adsorción, J/mol

R, es la constante universal de los gases, 8.314 J/mol K

Beta: β, es la constante del modelo Dubinin-Radushkevich,mol^2/kJ^2

Épsilon: ε, potencial de Polanyi el cual se relaciona con la concentración de equilibrio.

El parámetro de equilibrio o factor de separación adimensional, RL, permite definir el nivel de afinidad en el proceso de adsorción, se obtiene a partir de la isoterma de Langmuir:

$$\mathrm{RL} = \frac{1}{1 + (b * C_{max})} \quad (12)$$

Estudio cinético

Los ensayos se realizan para diferentes tiempos en los intervalos de 0 a 300 min, concentración de azul de metileno de 300 mg/L, pH de 5,5 u , concentración de biomasa de 10 g/L, agitación de 80 rpm a 30 ^{o}C de temperatura, la capacidad de sorción en el tiempo (q_t) se determina usando la ecuación (1). Los parámetros cinéticos, para los modelos seleccionados:pseudo primer orden, pseudo segundo orden, [2,9] Elovich, [12,14] difusión intraparticular,[14,15] seobtienen a partir de las ecuaciones específicas que representan a cada modelo, ecuación (13) a ecuación ((16) después de graficar según las correspondientes ecuaciones linealizadas (17) a (20). En la tabla 2 aparecen estas expresiones.

Tabla 2- Modelos cinéticos con ecuaciones para modelos y en la forma linealizada

Modelo	Ecuación del modelo	Ecuación forma linealizada
Pseudo-primer orden	$q_t = q_e\left(1-e^{-k_1 t}\right)$ (13)	$log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \left(\frac{k_1}{2.303}\right)t$ (17)
Pseudo-segundo orden	$q_t = \frac{t}{\left(\frac{1}{(k_{s2} \cdot q_{em}{}^2)}\right)+\left(\frac{t}{q_{em}}\right)}$ (14)	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{s2} \cdot q_{em}{}^2} + \frac{1}{q_{em}} \cdot t$ (18)
Elovich	$q_t = \frac{1}{b_E} \cdot ln(1 + a_B \cdot b_E \cdot t)$ (15)	$q_t = \frac{1}{b_E} \cdot ln(a_B \cdot b_E) + \frac{1}{b_E} \cdot ln(t)$ (19)
Difusión intraparticular	$q_t = K_{id} \cdot t^{0.5}$+ c (16)	$q_t = K_{id} \cdot t^{0.5} + c$ (20)

donde:

q_ey q_t, son la capacidad de sorción en el equilibrio y a cualquier tiempo t, respectivamente, mg/g

k_1, es la constante de velocidad de pseudo-primer orden, min $^{-1}$

k_{s2},simboliza la constante de velocidad de pseudo-segundo orden, g/mg*min

a_B,representa la velocidad de sorción inicial, mg/g*min

b_E, está relacionado con la extensión de la superficie ocupada, g/mg

t, es el tiempo, min

K_{id}, significa la constante de velocidad de difusión intraparticular, mg/g · min$^{-1/2}$

c, constante que brinda información sobre el espesor de la capa límite, mg/g

Aplicando el modelo de segundo orden puede obtenerse la velocidad de sorción inicial, h (mg/g*min), mediante la ecuación (21):

$$h = k_2 * q_e^2 \quad (21)$$

Análisis del error

Con el propósito de encontrar el modelo de mejor ajuste a los datos experimentales se consideraron los errores estadísticos suma de cuadrados del error,(SSE) yerror relativo promedio, (ARE), se describen matemáticamente mediante las Ecuaciones (22) y (23) respectivamente.

$$SE = \sum_{i=1}^{n} \left(x_{i,exp} - x_{i,calc\ mod}\right)^2 \quad (22)$$

$$\mathrm{ARE} = \frac{100}{\mathrm{n}} * \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left| \frac{x_{i,calc\ mod} - x_{i,exp}}{x_{i,exp}} \right| \quad (23)$$

donde:

$x_{i,\ exp}$ son los valores obtenidos experimentalmente

$x_{icalcmod}$ son los valores calculados por la ecuación que representa cada modelo

Desde: i = 1 hasta i=n, representa el número de comprobaciones.

Resultados y discusión

Estudio de equilibrio

En la representación de las isotermas experimentales y correspondientes a cada modelo para RAS y BCA (figuras 1 y 2), se observa la diferencia en las formas para los dos biosorbentes. Al considerar la clasificación de Giles et al, referida por [(13)] [(16)]la adsorción con los RAS corresponde a isoterma tipo S o sigmoidal, este tipo se produce cuando existe una moderada atracción intermolecular entre el

adsorbato y el adsorbente, en una primera etapa hay poca afinidad,se incrementa de forma proporcional a la concentración; mientras que la adsorción con BCA ocurre según isoterma tipo L sin meseta definida,esta característica sugiere que la cantidad adsorbida aumenta más lentamente, a medida que se incrementa la concentración del adsorbente, en el equilibrio, en la fase líquida.

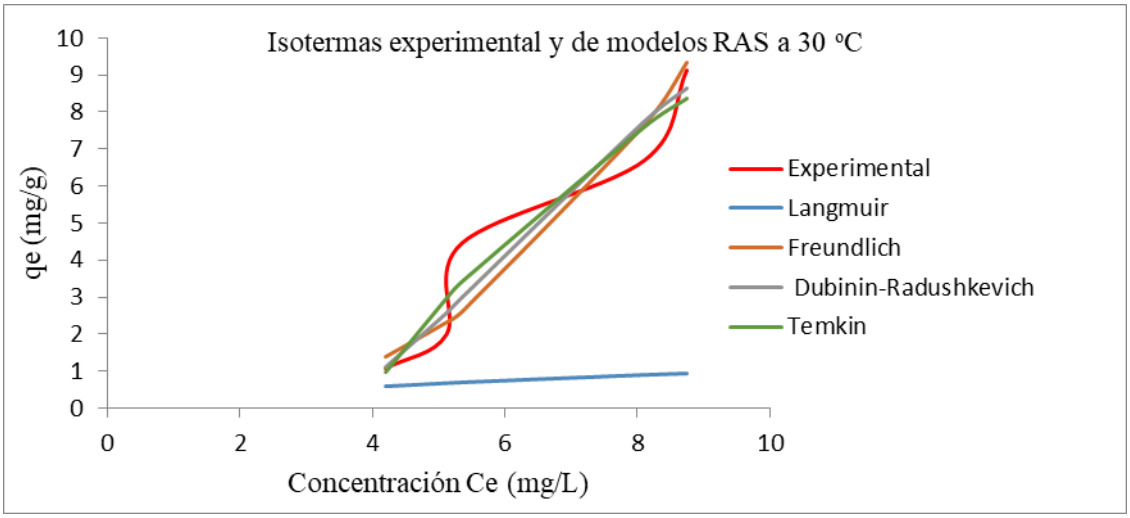

Fig. 1- Isoterma de adsorción de azul de metileno en disolución en RAS experimental y para modelos a temperatura 30 ^{o}C, concentración de biomasa de 10 g/L, agitación de 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 - 0,63) mm.

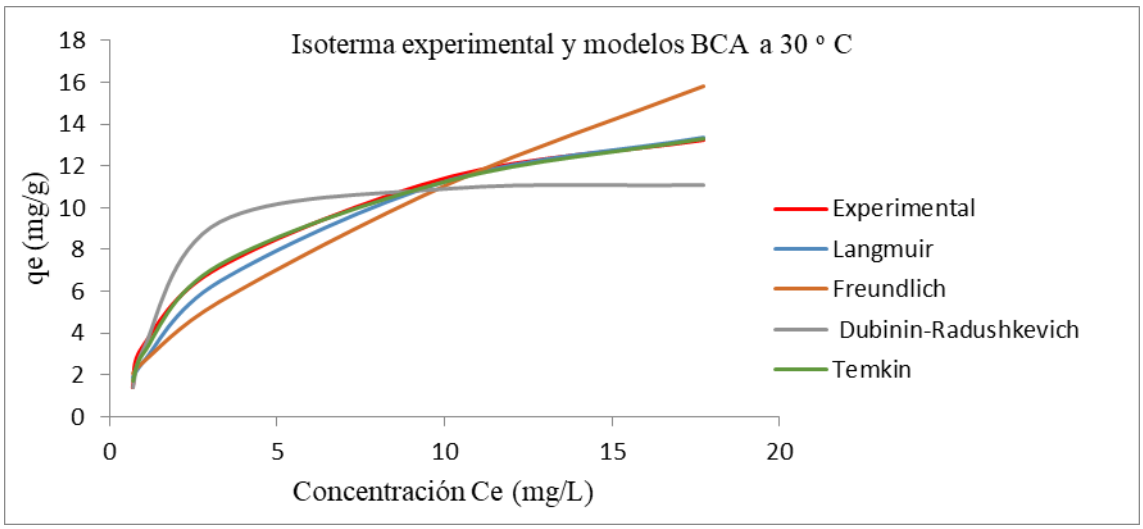

Fig.2- Isoterma de adsorción de azul de metileno en disolución en BCA experimental y para modelos a temperatura 30 ^{o}C, concentración de biomasa de 10 g/L, agitación de 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 - 0,63) mm.

En la tabla 3 se muestran los parámetros que definen cada modelo, con los valores de los respectivos coeficientes de correlación y errores estadísticos. El mejor ajuste, por los tres criterios, para ambos residuos, se presenta por el modelo de Temkin que se caracteriza por la distribución uniforme de energía hasta alcanzar la máxima energía de unión y supone una reducción proporcional del calor de adsorción con el grado de recubrimiento. Éste modelo plantea la hipótesis la disminución de la entalpía de adsorción al aumentar el grado de recubrimiento sobre el adsorbente.

Tabla 3- Parámetros para los modelos de isotermas Langmuir, Freundlich, Temkin y DubininRadushkevich para los RAS y BCA a concentración de biomasa de 10 g/L, agitación de 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 - 0,63) mm.

Biosorbente	RAS			BCA		
Temperatura (^{O}C)	30	40	60	30	45	60
Isoterma Langmuir						
q_m (mg/g)	2,044	1,0993	1,1698	17,5804	24,7193	18,2674
b (L/mg)	0,0969	0,1210	0,1333	0,1789	0,0765	0,1507
RL	0,001	0,008	0,007	0,006	0,013	0,007
R^2	0,6205	0,4663	0,4334	0,9656	0,7197	0,9691
SSE	116,68	134,44	136,23	1,28	5,38	1,41
ARE	74,39	82,29	81,78	13,63	19,78	11,15
Isoterma Freundlich						
n	0,3850	0,2793	0,2846	1,6014	1,2861	1,5372
K_F	0,0333	0,0066	0,0110	2,6240	1,8288	2,3853
R^2	0,8730	0,7799	0,7467	0,9095	0,8894	0,9329
SSE	4,63	6,33	7,06	10,53	17,19	7,54
ARE	20,29	31,32	30,95	22,73	25,34	19,39
Isoterma Temkin						
A_T	0,2626	0,2447	0,2718	2,3468	1,2558	2,0128
b_T	250,26	180,43	197,81	704,59	592,90	686,57
R^2	0,9217	0,9211	0,9980	0,9974	0,9946	0,9971
SSE	3,45	3,70	4,10	0,26	0,56	0,29
ARE	20,95	26,69	33,41	6,92	7,14	3,00
Isoterma Dubinin Radushkevich						
$q_{máx}$	17,3828	31,8991	32,3273	11,1832	11,8805	10,6063
β	-9,4203	-11,8993	-8,6449	-0,4022	-0,8175	-0,4371
ε	0,2304	0,2050	0,2405	1,1150	0,7821	1,0695
R^2	0,9191	0,8312	0,7910	0,9694	0.9893	0,9517
SSE	3,83	6,25	6,40	9,54	4,05	12,12
ARE	17,57	27,91	28,26	11,16	8,15	17,36

El valor del parámetro de equilibrio, obtenido a partir de la isoterma de Langmuir, para los dos sistemas a las tres temperaturas indica que la adsorción es favorable, al cumplirse que los valores se encuentran entre 0 y 1.

Estudio cinético

Los parámetros que definen a cada modelo cinético con sus coeficientes de correlación y errores SSE y ARE se detallan en la tabla 4. El modelo pseudo segundo orden presenta un coeficiente de correlación lineal, R^2 superior a 0,99 en todos los casos y con valores de capacidad de adsorción en el equilibrio calculados a partir del modelo análogos a los obtenidos experimentalmente. Estos resultadossugieren que el proceso de adsorción de azul de metileno con BCA y RASestá controlado por la adsorción química o quimisorción, involucrando fuerzas de atracción debidas a las valencias o intercambio de electrones entre el azul de metileno y los grupos funcionales presentes en esas superficies.

Existe coincidencia en el mejor ajuste al modelo de pseudo segundo orden con criterios de error SSE y ARpara el BCA, sin embargo, para RAS corresponden al modelo Elovich que también reproduce de forma aceptable los resultados con 0,942 3 de R^2.

La velocidad de sorción inicial es cuatro veces superior para BCA.

Resultados similares han obtenidopara la adsorción de AM sobre pericarpio de Zea mays, residuo de Medicago sativa y bagazo de Agave tequilana, [6] utilizando cáscara de yuca modificada con ácido oxálico para remover azul de metileno en disolución [9] y en la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca.[5]

Los parámetros que se presentan en la tabla 4, corresponden a los modelos cineticos. pseudo primer orden, pseudo segundo orden, Elovich y difusión intraparticular para los estudios en discontinuo correspondiente al proceso de biosorción para azul de metileno con RAS y BCA a temperatura 30°C para tiempo de contacto hasta 300 min, concentración de azul de metileno de 300 g/L, concentración de biomasa de 10 g/L, agitación de 80 rpm, pH de 5,5 u y tamaño de partícula (0,35 -0,63) mm.

Tabla 4-Parámetros que definen a cada modelo cinético con sus coeficientes de correlación y errores SSE y ARE

Biosorbentes		RAS	BCA
Pseudo primer orden	k_1(min $^{-1}$)	-0,01	-0,03
	q_e (mg/g)	4,40	1,456
	R^2	0,8325	0,7896
	SSE	168,42	4919
	ARE	52069	1988
Pseudo segundo orden	k_{S2} (g/mg*min)	0,019	0,076
	q_e (mg/g)	28,359	29,798
	h (mg/g*min)	15,28	67,48
	R^2	0,9999	1,0000
	SSE	156,38	17,54
	ARE	7,07	2,17
Elovich	a_B (mg/g*min)	$8,94*10^5$	$3,07*10^7$
	b_E(g/mg)	0,65	0,72
	R^2	0,9423	0,6851
	SSE	5,38	37,070
	ARE	2,06	5,16
Difusión intraparticular	k_{id} (mg/g min$^{-1/2}$)	0,45	0,34
	c (mg/g)	22,25	25,71
	R^2	0,7321	0,3699
	SSE	24,96	74,16
	ARE	4,95	7,37

Conclusiones

Los datos obtenidos del equilibrio de biosorción a diferentes temperaturas se ajustanmejor al modelo de isotermas de Temkin, por eso los procesos de adsorción de azul de metileno con RAS y BCA pueden describirse bien como sistemas que presentan distribución uniforme de energía hasta alcanzar la máxima energía de unión con una reducción proporcional del calor de adsorción con el grado de recubrimiento.

La constante de equilibrio y la constante relacionada con el calor de adsorción del modelo Temkinson muy superiores para el BCA, lo que podría sugerir mejores propiedades adsorbentes.

El modelo cinético de pseudo segundo orden representa de forma excelente la adsorción de azul de metileno con RAS y BCA, considerando los criterios coeficiente de correlación y error relativo promedio, lo que indicaque estos procesos están controlados por la adsorción química o quimisorción.

El modelo pseudo segundo orden evidencia que la velocidad de sorción inicial para los BCA es superior a los RAS, sin embargo, las capacidades máximas de adsorciónson análogas.

Referencias bibliográficas

1. FIGUEROA, D., MORENO, A., HORMAZA, A. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín.* 2015,**14**(26), pp. 105-120. ISSN 1692-3324.

2. CAMPOS MEDINA, E., GÓMEZ HINOJOS, A. M., VELÁZQUEZ RODRÍGUEZ, A. Estudio de la remoción del colorante azul de metileno empleando la biomasa de la MorindaCitrocifolia L. Quivera. 2011, **13** (2), pp. 52-62. ISSN 1405-8626. http://w.w.w.redalcy.org/articulo.oa?id=40119956004

3. VILLADA-VILLADA, Y., HORMAZA-ANAGUANO, A., CASIS, N. Uso de la cascarilla de arroz para la remoción de azul de metileno en columnas de lecho empacado. *Tecno Lógicas*. 2014, **17** (33), pp. 43-54. ISSN 0123-7799.

4. HAMEED, B. H. Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carboanactívate prepared from rattan sawdust. *Dyes and Pigments*. 2007, diciembre. **75**. 143-149. Consultado 14 de julio de 2021. DOI: 10.1016/j.dyepig.2006.05.039

5. CASTELLAR ORTEGA, G. y col. Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca. Revista MVZ Córdoba. 2019, **24** (2), pp 7231-7238. ISSN: 1909-0544. DOI: 10.21897/rmvz.1700

6. ROSAS CASTOR J.M. *Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes*., Tesis presentada en opción al grado

científico de Máster en Ciencias con orientación a procesos sustentables. M.T. Garza González y R.B. García Reyes (dir.). Universidad Autónoma de Nuevo León. México, 2012.

7. TRUJILLO MIRANDA, M.C. y colaboradores. Simultaneousbiosorption of methylene blue and chromiumtrivalentonto olive Stone. *Desalinition and WaterTreatment.* URL: http://mc.manuscripycentral.com/tdwt

8. ROMINA AVILA, C. *Remoción de azul de metileno en agua empleando bagazo de agave salmiana como biosorbente*. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Máster en ciencias ambientales. P. E. Díaz Flores, M. Sturm (dir.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México, 2011.

9. ALBIS ARRIETA, A., y colaboradores. *Adsorción de azul de metileno utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada químicamente con ácido oxálico*. rev. Ion. 2018, **31**(2), 99-110. Consultado 14 de julio de 2021. doi:10.182737revion.v31n2-2018007

10. JIMÉNEZ AKÉ, L., JACOBO AZUARA, A. Estudio de las propiedades fisicoquimicas de biosorbentes para la remocion de cromo VI en agua. *Jóvenes en la ciencia*. 2015, **2** (2), pp 229-234. URL: http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx. Consultado 14 de julio de 2021.

11. BERMEJO CAMPOS, D. F. Remoción de plomo y cadmio presente en aguas residuales mineras mediante biosorción en columnas con bagazo de caña y cáscara de cacao. *Tesis para obtener título de Ingeniero Ambiental*, Maria Fernanda Uguña Rosas (dir.) Universidad de Cuenca, Ecuador, 2016**.**

12. MARTÍN LARA, M.A. Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. *Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor*. F HernáinzBermúdez de Castro, Mónica Calero de Hoces y Gabriel Blázquez García (dir.). Universidad de Granada. España, 2008.

13. CUIZANO VARGAS, N.A. Adsorción de colorantes catiónicos en soluciones acuosas por perlas de alginato de calcio con maghemita. Tesis para optar el grado de Maestro en Química. Universidad peruana Cayetano Heredia. Lima, 2018.

14. PRIETO GARCÍA, J. O.,RODRÍGUEZ SUÁREZ, E., MOLLINEDA TRUJILLO, A. Estudio de los mecanismos cinéticos y difusivos en la adsorción de cu (ii) en ceniza de bagazo de caña de azúcar. Centro Azúcar. 2016, octubre- diciembre, **43** (4) p. 36-41. Consultado 13 de julio de 2021. ISSN 2223-4861. http://centroazucar.uclv.edu.cu

15. MORENO PIRAJAN , J.C., GIRALDO, l., GONZÁLEZ, J.F. Adsorción de Fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cáscara de Coco: isotermas y cinéticas de adsorción. *AfinidadLXVIII.* 2011, **554**, 290-295.ISSN, 0001-9704 Consultado 14 de julio de 2021.

16. AYLAS OREJÓN, E.J. *Estudio de la adsorción de fenol, 4-nitrofenol y 4-clorofenol utiliando carbon activado modificado con cobre*. Tesis para optar el grado de Magister en Química. Pontificia Universidad Católica del Perú. San Miguel, 2018.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

- MariaHertha Broche Galindo, tiene participación en la realización de los ensayos de equilibrio para RAS, ambos estudios cinéticos, la determinación de coeficientes de correlación y errores, el ajuste a modelos termodinámicos para RAS y en el estudio, análisis y escritura del artículo.
- Iván Leandro Rodríguez Rico, interviene en ambos estudios cinéticos, en el ajuste a modelo cinético pseudo segundo orden y en la revisión del artículo.
- Maira Maria Pérez Villar, contribuye en los ensayos de equilibrio para BCA, ajuste a modelos termodinámicos para BCA y en la revisión del artículo.
- Julio Omar Prieto Garcíaasiste en el ajuste a modelos cinéticos pseudo primer orden, Elovich y difusión intraparticular