

Adsorción de Cr VI sobre residuos de café

Pablo Cubides Guerrero* y José Herney Ramírez Franco

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Facultad de Ingeniería – Av. Carrera 30 No. 45-03, Ciudad Universitaria Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Química.

*Autor de correspondencia: pacubidesg@unal.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se estudió el proceso de adsorción de cromo VI en 3 diferentes adsorbentes; carbón activado comercial, carbón activado preparado a partir de residuos de café y los residuos de café. De estos se eligió el residuo de café (cuncho), como la mejor alternativa entre las analizadas, para este propósito se trabajó como modelo de estudio, soluciones acuosas de dicromato de potasio en concentraciones de 5µg/ml (expresada como cromo VI) y diferentes dosificaciones de residuo de café; la concentración de cromo VI se analizó por espectrofotometría a 540 nm y la de cromo total se realizó por absorción atómica, para este proceso se analizaron las isothermas de adsorción y se determinó que el proceso se adapta al modelo de Freundlich, la cinética de la adsorción es de segundo orden y se llegaron a obtener adsorciones superiores al 95% de cromo VI.

Palabras clave: adsorción, cromo, Langmuir, Freundlich.

Editora: Pataquiva-Mateus, A.Y.

Citation: Cubides-Guerrero, P.A. y Ramírez-Franco, J.H. (2014). **Adsorción de Cr VI sobre residuos de café.** *Revista Mutis 4(2)*.

Received: October 1, 2014; **accepted:** December 2, 2014; **Published online:** December 31, 2014

Copyright: ©2014 Cubides-Guerrero, P.A. y Ramírez-Franco, J.H. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Adsorption of Cr VI on waste of coffee

Abstract

In this work the adsorption of Cr (VI) using 3 different adsorbents was studied. Evaluated adsorbents used were: commercial activated carbon, activated carbon obtained from coffee residues, and coffee residues. Adsorption experiments were carried out contacting a 5µg/ml synthetic aqueous solution of Potassium dichromate (Cr VI)) with different amounts

of adsorbents. Cr VI concentration was determined by spectrophotometry at 540 nm, and total chrome in solution was measured by atomic absorption. According with results coffee residue showed the best adsorption performance, showing a Freundlich-type isotherm behavior. The kinetic of the adsorption is second order with respect to Cr VI, and removal higher than 95% was obtained.

Keywords: Adsorption, Chrome, Langmuir, Freundlich.

Introducción

El río Bogotá es un río de menos de 380 km de longitud que drena las aguas de 6.000 kilómetros cuadrados, en los cuales hay 42 municipios y donde habitan más de doce millones de personas, 20% de la población y más del 25% de la actividad económica del país (Planeación, 2013), de los cuales 7'739.834 habitantes (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014) pertenecen a la ciudad de Bogotá, El agrupar esta población y las actividades económicas que estas realizan en un área tan pequeña ocasionan que el río Bogotá tenga graves problemas de contaminación.



La cuenca media del río Bogotá es la principal fuente de agua para la producción agrícola en los municipios aledaños del noroccidente y sur de la ciudad de Bogotá, que comprende 650 ha de cultivos hortícolas (Miranda, Rojas, Jerez, Fischer, & Zurita, 2008). La contaminación del río Bogotá por los vertimientos de aguas residuales de los municipios de la cuenca ha sido un problema a resolver desde la primera mitad del siglo anterior. Dentro de ellos se estima que el río Bogotá recibe diariamente 318 kg de cromo siendo el metal pesado que se vierte en mayor cantidad al río (Ideam, 2002).

Los vertimientos a los que se ve sometido el río Bogotá a lo largo de su recorrido generan problemas de salud en la población así como problemas ambientales a largo plazo, lo cual ha sido demostrado por los estudios realizados por diferentes investigadores y entidades; entre ellos cabe mencionar los estudios de Cuberos, Rodríguez, & Prieto, 2009; Penagos, 2013; Porras, 2010; y Rojas & Antonio, 2008. Además de lo mencionado, en estos estudios queda evidenciado el alto grado de contaminación del río, con elementos traza como el cromo y el cadmio entre otros metales pesados.

Numerosas técnicas se han desarrollado en el mundo para la remoción de cromo VI entre los que cabe mencionar la utilización de quitosano hecha por Apodaca-Díaz (2007), el estudio de las cinéticas del proceso hecha por Hamadi, Chen, Farid, & Lu (2001), y por último la caracterización del proceso de adsorción de cromo VI en hueso de aceituna hecha por Rivas (2006).

Con el presente trabajo se pretende mostrar una alternativa, para la remoción de este metal usando un residuo, así como la evaluación y caracterización de este material con el fin de evaluar la factibilidad de su uso. El primer paso fue comparar 3 diferentes adsorbentes los cuales fueron: carbón activado comercial, carbón activado preparado a partir de residuos de café (cunchos) y residuos de café sin tratamiento. Una vez seleccionado el mejor se realizó un estudio de las isotermas y de las cinéticas de adsorción de ese material.

Isotermas

Los modelos de isotermas de adsorción más utilizados para un único componente son el de Langmuir (1915) y el de Freundlich (1939). Ambos modelos describen

una amplia gama de equilibrios de adsorción y permiten una interpretación física sencilla de cómo se producen las interrelaciones entre una sustancia adsorbida y una fase que adsorbe (Ríos, 2008).

Isoterma de Langmuir

Este modelo se desarrolló originalmente para representar la adsorción gas-sólido con carbón activo. En este modelo la atracción entre los iones del metal y la superficie del adsorbente se basa principalmente en fuerzas físicas y no tiene en cuenta las agrupaciones moleculares ni las variaciones de energía de la interacción con el material. La principal hipótesis del modelo es que la superficie de adsorción es uniforme.

La expresión matemática de la ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$q_e = q_{max} * \frac{C_e * b}{1 + b * C_e} \quad (1)$$

Donde: q_{max} es la constante de Langmuir que denota la capacidad máxima de adsorción de la adsorbente [mg/g]. b : Constante de Langmuir que indica la afinidad por los sitios activos y con el calor de adsorción y C_e es la concentración en el equilibrio en ($\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$).

El cálculo de q_e se realiza a partir de los datos experimentales de la siguiente forma:

$$q_e = V * (C_i - C_e) / w \quad (2)$$

Siendo V el volumen de la disolución, (dm^3), C_i la concentración inicial en ($\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$) y w el peso del adsorbente (g).

Para poder determinar los valores q_{max} y b para de cada pareja contaminante-adsorbente se realiza la ecuación (3)

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{Q_{max}} \right) + \left(\frac{1}{b * Q_{max}} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) \quad (3)$$

Representando $1/q_e$ frente a $1/C_e$ se encuentra el valor de $1/b \cdot q_{max}$ como la pendiente y $1/q_{max}$ como valor de la ordenada al origen (Rivas, 2006).

Isoterma de Freundlich

La expresión de Freundlich es un caso especial para

energías superficiales heterogéneas donde el término b de la ecuación de Langmuir (1) varía en función de la superficie cubierta a causa de variaciones del calor de adsorción. Por lo tanto, en estos casos, se considera que la superficie de adsorción es heterogénea y que las interacciones entre el contaminante y el adsorbente no son siempre iguales.

La expresión empírica de Freundlich se define como:

$$q_e = K * C_e^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Siendo q_e el valor de extracción del metal (mmol metal·g⁻¹ biosorbente), C_e la concentración de equilibrio del metal en disolución, K una constante de equilibrio y n una constante referida a la energía de adsorción entre contaminante-adsorbente.

La Ecuación (4) puede linealizarse en forma de logaritmos:

$$\ln q_e = \ln K + \left(\frac{1}{n}\right) * \ln (C_e) \quad (5)$$

Esta linealización permite determinar la constante K , que es un indicador de la capacidad de adsorción y el valor de $1/n$ que indica la intensidad de la adsorción (Rivas, 2006).

Cinética

El mecanismo de control del proceso de biosorción de metales se estudiará por el ajuste de modelos cinéticos de primer y segundo orden de los datos, el modelo linealizado de primer orden cinético se da como:

$$\log(Q_c - Q_t) = \log Q_c - 0.4342k_1 t \quad (6)$$

Donde Q_c y Q_t son las cantidades de iones metálicos adsorbidos por unidad de masa de biosorbente (mg/g) en el equilibrio y en el tiempo t respectivamente, y k_1 es la constante de velocidad de primer orden de adsorción.

El modelo linealizado de segundo orden modelo cinético se da como

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_c^2} + \frac{t}{Q_c} \quad (7)$$

Donde k_2 es la constante de velocidad cinética para la adsorción de segundo orden (g mg⁻¹ min⁻¹). Las gráficas lineales de $\log(Q_c - Q_t)$ contra de t y de t/Q_c contra t se utilizarán para determinar las constantes de velocidad y coeficientes de correlación para los modelos cinéticos de primer y segundo orden (Rivas, 2006).

Materiales y Métodos

Adsorbentes

Residuo de café

El residuo de café (cuncho) es un subproducto de la preparación de café, se separa por filtración en las preparaciones tanto hogareñas como industriales; este residuo generalmente no tiene un uso comercial y su disposición final es en rellenos sanitarios o son llevados a un proceso de quemado. Se usaron dos fuentes del cuncho, la primera fue de las cafeterías de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, las cuales reportaron una generación cercana a 1 tonelada mensual de este subproducto. Y la segunda, café preparado de manera artesanal en el municipio de Bojacá (Cundinamarca) de marca Aroma con la intención de que este no contenga aditivos que puedan interferir en los resultados.

Una vez recolectados los residuos se procedió a adecuarlos por medio de un lavado con agua para retirar impurezas y disminuir el color en el filtrado. Una vez realizados los lavados se procedió a secar el material, este se realizó en un horno a 60 °C durante 24 h.

Preparación del carbón activado

Se tomó una muestra de 44.7 gramos de café previamente secado y se empleó una solución de H₃PO₄ al 85%, la muestra se impregnó con un factor de 100% P (X=g H₃PO₄/g definido como la relación entre el peso de ácido al peso del precursor) se dejaron en contacto 24 horas a una temperatura de 60 °C y presión atmosférica, se realizó una precarbonización en una cámara de extracción con una plancha de calentamiento durante 48 horas a una temperatura de 350 °C y presión atmosférica y posteriormente se llevó a un horno a una temperatura de 500 °C y presión atmosférica, se apagó el horno y se llevó hasta 50 °C y luego se retiraron. Esta muestra se lavó 3 veces con agua destilada y dos veces con una solución de NaOH para llegar a un pH neutro (Sevilla, 2011).

Solución de dicromatos

La solución madre se preparó pesando 0.1415 g de K_2CrO_7 Grado analítico Marca Merck en una balanza analítica, y llevándolo a 100 ml logrando una solución madre de 500 μ gCr/ml. De la solución madre se tomó 1 ml y se llevaron a 100 ml con el fin de obtener patrones de solución de 5 μ gCr/ml o 0.6 ml para obtener los patrones de 3 μ gCr/ml

Métodos de análisis

Para la determinación de la concentración de cromo VI se utilizó un espectrofotómetro UV-visible Spectronic Genesys 5 usando celdas en borosilicato ajustado a una longitud de onda de 540 nm, acoplado a una solución de difenilcarbazida la cual se prepara al momento de su uso, para su preparación se usaron 10 ml, por lo cual se pesaron 50 mg de 1.5-difenilcarbazida (difenilcarbohidrazida) y se disolvieron en 10 ml de acetona. La absorbancia del equipo se relacionó con la concentración del contaminante a través de una curva de calibración generando una ecuación del tipo:

$$Abs = 0.6177 * [Cr6] \quad (8)$$

Para el ajuste del pH de las soluciones se utilizó un potenciómetro marca Orion modelo Sa520, para la determinación de cromo total se usó el equipo de adsorción atómica marca Thermo elemental serie solar S. con una llama aire-acetileno que es la recomendada para este catión. El equipo cuenta con un computa-

dor que se encarga del ajuste de la longitud de onda y determina la concentración de la muestra analizada, previa introducción de los patrones los cuales se prepararon a partir de soluciones patrón de cromo MERCK lote HC114887.

Resultados y Discusión

Comparación de agentes adsorbentes

Para comparar los 3 agentes adsorbentes se hicieron ensayos por duplicado en los cuales se colocó en un equipo de test de jarras, 4 vasos de precipitados con 800 ml de una solución problema de Cr de aproximadamente 3 ppm y se dejó en agitación con 1 gramo de cada agente adsorbente con un tiempo de contacto de una hora, este tiempo se eligió porque para adsorbentes similares se necesitan tiempos de contacto menores (Oliveira, Franca, Oliveira, & Rocha, 2008; Carriazo & Castillo, 2011) y se pensó en este tiempo como una medida estándar para llegar al equilibrio o muy cerca a este. Después las muestras de agua obtenidas se dejaron decantar por 5 minutos, se hizo una filtración para remover el agente adsorbente y la muestra se analizó en el equipo de adsorción atómica para determinar cromo total al inicio y al final del proceso.

De las dos mediciones obtenidas para cada agente adsorbente en cada parte del proceso se sacó el promedio el cual se reporta en la tabla 1. A cada una de las medidas se le calculó el coeficiente de variación expresado como la varianza sobre el promedio.

Tabla 1. Comparación entre los 3 diferentes agentes adsorbentes

		Medida 1	Medida 2	Promedio	Desviación	Coef. Var.
Muestra café 1	inicial	3.13	3.226	3.18	0.068	2.14%
	Final	1.51	1.6848	1.60	0.124	7.74%
Muestra café 2	inicial	2.82	2.9468	2.88	0.090	3.11%
	Final	1.53	1.5724	1.55	0.030	1.93%
Carbón café	inicial	2.89	3.0416	2.97	0.107	3.61%
	Final	1.48	1.6178	1.55	0.097	6.29%
Carbón comercial	inicial	3.09	3.2806	3.19	0.135	4.23%
	Final	1.58	1.6762	1.63	0.068	4.18%

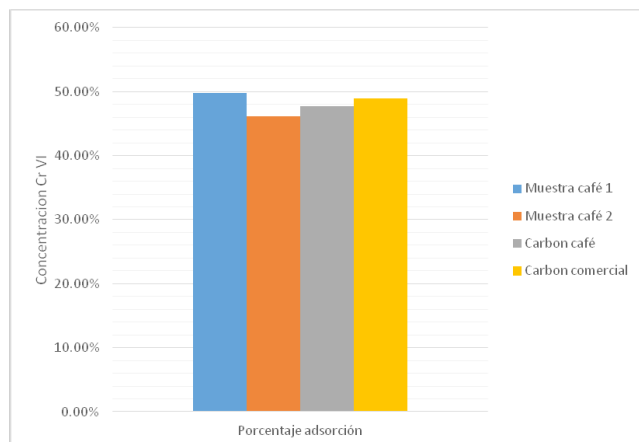


Figura 1. Comparación entre adsorbentes, concentración en PPM antes y después del ensayo

A partir de los resultados (ver figura 1) se puede ver que los 4 agentes adsorbentes estudiados tienen adsorciones de cromo VI similares, pero ya que los cunchos de café sin tratamiento poseen un menor costo se considera la opción más favorable, por este motivo de aquí en adelante se trabajará con dicho adsorbente. En la figura 2 se observa la muestra de agua antes y después del proceso de tratamiento, la imagen de la izquierda corresponde a la muestra antes del proceso y se ve una coloración amarilla la cual disminuye significativamente en la figura de la derecha.

Aunque los resultados en adsorción atómica son más precisos, los costos, la facilidad del equipo y como la especie más tóxica es el cromo VI, se decidió trabajar con espectrofotometría UV para caracterizar la capacidad adsorbente del material.

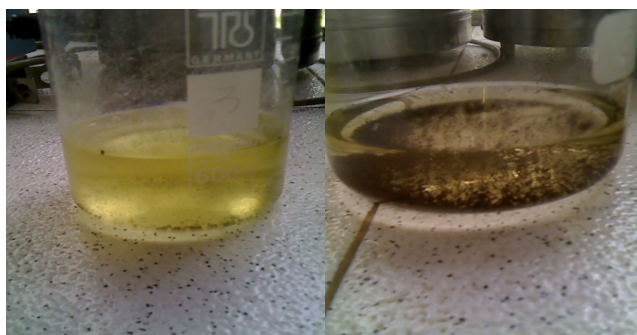


Figura 2. Imagen de los ensayos antes (izquierda) y después (derecha) del proceso con cunchos de café

Isoterma de adsorción

Para la construcción de la isoterma de adsorción se realizó el mismo montaje descrito en la parte de comparación de los agentes adsorbentes, cada solución se dejó por un tiempo de 60 min a una temperatura de 36 °C con dosificaciones de residuo de café entre 0.01% y 4% en peso. Transcurrido el tiempo se registró el valor de absorbancia para cada muestra.

Tabla 2. Resultados experimentos a diferentes concentraciones de agente adsorbente (residuos de café) en el cual se muestra la absorbancia obtenida y la cantidad remanente en la solución

Masa Café	medida	Equilibrio (ppm)	Cantidad remanente (mg)
Real	ABS		
0.0048	1.20	1.95	0.0973
0.0101	0.95	1.54	0.0772
0.0149	0.87	1.40	0.0701
0.0197	0.35	0.56	0.0279
0.9574	0.02	0.03	0.0016
1.9148	0.02	0.02	0.0012

A partir de los resultados experimentales obtenidos y reportados en la tabla 2 y por medio de las ecuaciones (3) y (5), se obtuvieron los parámetros para los modelos de Langmuir y Freundlich para cada concentración de agente adsorbente, los cuales se graficaron para cada modelo. Las gráficas se presentan a continuación (figuras 3 y 4).

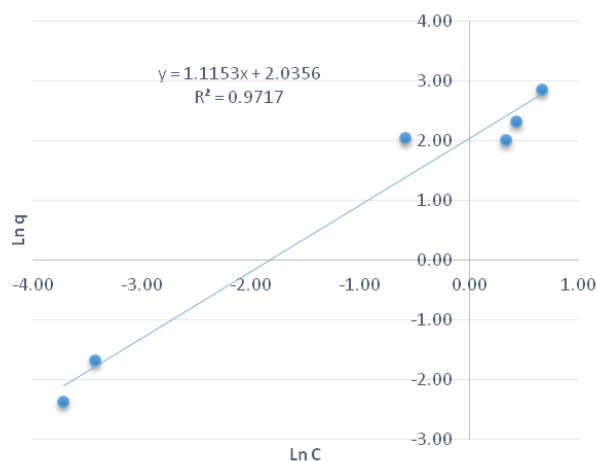


Figura 3. Resultados usando el modelo de Freundlich

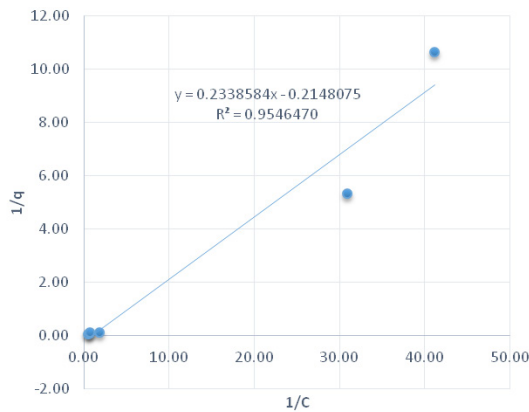


Figura 4. Resultados usando el modelo de Langmuir

Al observar los valores de los factores de correlación se ve que el sistema se ajusta mejor al modelo de isoterma de Freundlich con lo cual sacamos los parámetros gracias a la ecuación (5). Obtenemos los parámetros K y (1/n) los cuales serían a partir de la figura 2:

$$\frac{1}{n} = 1.1153$$

$$n = 0.896$$

$$\ln(Kf) = 2.035$$

$$Kf = 7.65$$

Por su parte el modelo de Langmuir también muestra una correlación aceptable por lo cual a partir de los resultados de la ecuación (3) se obtiene los siguientes parámetros:

$$\frac{1}{Q_{max}} = 0.2338$$

$$Q_{max} = 4.2771 \frac{mg}{g}$$

$$\frac{1}{Q_{max} * b} = 0.21480$$

$$b = 1.09$$

Los cuales si se comparan con valores reportados en la tabla 3, se ve que aunque su capacidad de adsorción por gramo de adsorbente es baja en comparación a la mayoría de los compuestos, al ser un residuo sin ningún tratamiento, tiene un valor aceptable. Para el factor b (el que describe la afinidad del agente adsorbente con el cromo) se encuentra que es uno de los compuestos que más tiene afinidad con el cromo VI. Estos dos factores indican que los residuos de café sin tratar son un buen agente adsorbente para cromo VI.

Tabla 3. Parámetros de Langmuir para varias clases de adsorbentes. (Altaş, Kiliç, Koçyiğit, & Işık, 2011)

Biosorbente	Condiciones de operación		Parámetros de Langmuir		
	PH inicial	T (°C)	K _L (L/mg)	q _m (mg/g)	R ²
<i>Rhizopus arrhizus</i>	1.3	30	0.3310	23.92	0.965
<i>Tamarindus indica</i> (semeillas)	2	29	16023.07	0.098	0.938
	4		3191.93	0.055	0.907
	6		72.43	0.08	0.954
	8		1.3600	0.023	0.958
Lana	2	30	7.5E-3	41.15	
Cáscaras de tamarindo crudo	3		0.0500	74.62	0.99
Cáscaras tratadas con HCl			0.0700	140.84	0.99
Cáscaras tratadas con ácido oxálico			0.0350	151.51	0.99
<i>Salvinia cucullata</i> , yerbajos	4.69	30	-0.0100	23.98	0.86
			0.0130	232.60	0.99
<i>Sccharomyces cerevisiae</i>	2		0.1259	384.61	0.938
<i>Spirulina platensis</i> fresca	1.5	25	0.0270	188.68	0.960
<i>Spirulina platensis</i> usada			0.0500	212.76	0.99
<i>Chlorella vulgaris</i>			0.0360	163.93	0.96
Chitosan en perlas	5		3.421E-3	76.92	0.99
<i>A.niger</i>	2.2	25	0.0026	17.61	0.98
<i>A.sydoni</i>			0.0022	9.07	0.97
<i>P.janthinellum</i>			0.0042	9.35	0.95
Cáscara de bengala			0.0090	91.64	0.99
Médula de coco modificado con surfactante	2	32	0.1240	76.30	0.98
<i>Bacillus licheniformis</i> muerto	2.5	50	0.0300	69.35	0.99
<i>Lungbya putealis</i>	3	25	0.1040	105.30	0.90
<i>Lungbya putealis</i> exopolysacáridos	2	45	0.1890	178.60	0.99
Aserrín tratado	4.5-6		2.3600	3.60	
Lily de agua	5	30	0.0270	5.11	0.98
Jacinto de agua			0.9170	0.34	0.99
Taro verde			0.0420	1.42	0.99
Hojas de mangle			0.0440	5.72	0.99
Estera de caña			0.0390	1.66	0.99
<i>Asgaricus bisporus</i>	1	20	0.0700	8.00	0.99

Cinética de adsorción

Para la realización de la cinética de adsorción se usó el mismo montaje utilizado en las isotermas de adsorción descritas anteriormente; a una temperatura inicial y pH de 35 °C y 1.6 respectivamente usando dos montajes con la cantidad de contaminante y agente adsorbente constantes y tomando pequeñas alícuotas a diferentes tiempos.

En el cálculo del orden de la cinética del proceso de biosorción, se halló la cantidad de cromo al inicio y para cada tiempo restando las concentraciones remanentes de la concentración inicial podemos sacar la cantidad de cromo adsorbida para cada tiempo, mediante lo cual se calculan los datos de tiempo vs log ($Q_c - Q_t$) para primer orden y tiempo vs (t/qt) para segundo orden y estos resultados se graficaron y se obtuvo la línea de tendencia (figura 5) en la cual se observa claramente que este comportamiento se ajusta a un modelo de segundo orden.

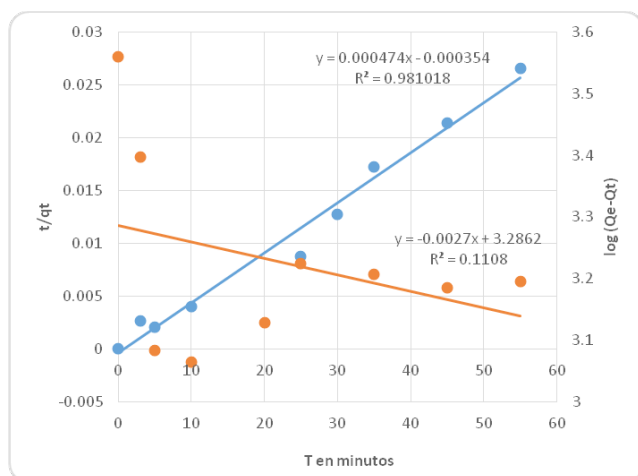


Figura 5. Cinéticas de primer (rojo) y segundo (azul) orden en el eje principal esta los datos de segundo orden y en el eje secundario las de primer orden.

Un análisis adicional que se hizo fue calcular el porcentaje de adsorción en función de la cantidad de los cunchos de café adicionados (ver figura 6) usando el programa Table curve de Sigmaplot (*Table Curve 2D by Systat Software*); lo que proporciona una ecuación para los datos reportados. Esta ecuación posee un factor de correlación de 0.939 el cual es aceptable. Esta ecuación es de la forma:

$$Y = a + b(x) \ln(x) + c(x)^{0.5} + d \ln(x)$$

Con $a = 2.85$ $b = -13.29$ $c = -14.20$ $d = 0.22$

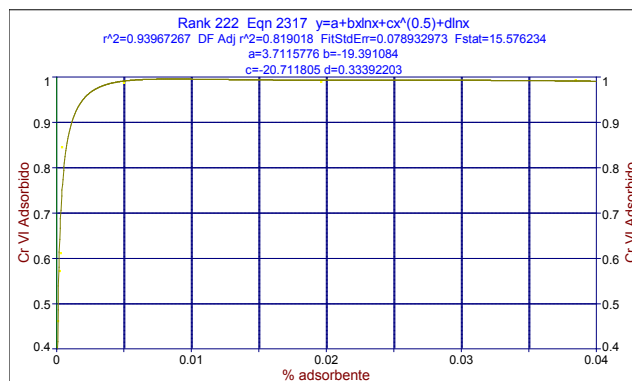


Figura 6. Porcentaje adsorbido en función del porcentaje en peso de adsorbente en relación al peso de la muestra de agua

Conclusiones

Al comparar los 4 adsorbentes se puede deducir que para el caso de adsorción de cromo VI en las condiciones estudiadas no hay diferencias significativas en los porcentajes de adsorción de ellos.

El proceso de adsorción usando este tipo de sólidos presenta potencial para tratar las aguas residuales del proceso de curtido, ya que elimina gran parte del cromo VI presente en pequeñas cantidades con un buen tiempo de contacto y una temperatura de 36 °C.

La adsorción de cromo con cunchos de café se ajustó a un modelo de Freundlich y a una cinética de segundo orden.

Finalmente, se obtuvo una ecuación que relaciona el porcentaje de adsorción en función de la cantidad de café adicionado, con un buen ajuste matemático.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá, S. D. de P. (2014). Reloj de población. Retrieved June 30, 2014. from <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/RelojDePoblacion>
- Altaş, L., Kiliç, A., Koçyiğit, H., & Işık, M. (2011). Adsorption of Cr(VI) on ureolytic mixed culture from biocatalytic calcification reactor. *Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces*, 86(2), 404–8. doi:10.1016/j.colsurfb.2011.04.031
- Apodaca-Díaz, E. D. de. (2007). Utilización de adsorbentes basados en quitosano y alginato sódico para

- la eliminación de iones metálicos: Cu²⁺, Pb²⁺,. *Revista Iberoamericana de ...*, 8(1), 20–37. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:UTILIZACIÓN+DE+ADSORBENTES+BASADOS+EN+QUITOSANO+y+ALGINATO+SÓDICO+PARA+LA+ELIMINACIÓN+DE+IONES+METÁLICOS:+Cu2+,+Pb2+,+Cr3++y+Co2+#0>
- Carriazo, J. G., & Castillo, E. (2011). Estudio de materiales adsorbentes de bajo costo para remover Cr (VI) de efluentes acuosos RESUMEN A study of low - cost adsorbent materials for removing Cr (VI) from aqueous waste effluent, 31(1), 154-162.
- Cuberos, E., Rodríguez, A., & Prieto, E. (2009). Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 11(2), 278–289. Retrieved from <http://www.scielosp.org/pdf/rsap/v11n2/v11n2a12.pdf>
- Hamadi, N., Chen, X., Farid, M., & Lu, M. (2001). Adsorption kinetics for the removal of chromium (VI) from aqueous solution by adsorbents derived from used tyres and sawdust. *Chemical Engineering Journal*, 84, 95–105. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894701001942>
- Ideam. (2002). VI Fase de seguimiento de efluentes industriales y corrientes superficiales en Bogotá D. C. *Bogotá, Colombia*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:VI+Fase+de+seguimiento+de+efluentes+industriales+y+corrientes+superficiales+de+Bogotá#0>
- Miranda, D., Rojas, C. A., Jerez, C. M., Fischer, G., & Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. Accumulation of heavy metals in soil and plants of four vegetable crops irrigated with water of Bogota river, 2(2), 180–191.
- Oliveira, W. E., Franca, A. S., Oliveira, L. S., & Rocha, S. D. (2008). Untreated coffee husks as biosorbents for the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 152(3), 1073-81. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.085
- Penagos, N. O. (2013). Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante un proceso sostenible. Retrieved from <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/handle/6789/1076>
- Planeación, D. Nacional de. (2013). Conpes 2013.
- Porras, Á. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-50. Retrieved from <http://cdigital.udem.edu.co/ARTICULO/R176000172010190489/ARTICULO3.pdf>
- Ríos, M. G. (2008). Biosorción de cadmio con raspo de uva. Aproximación a la monitorización del proceso mediante sensores químicos, 1-101. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5503>
- Rivas, G. (2006). Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. *Universidad de Granada, Facultad de Ciencias*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Caracterización+de+la+biosorción+de+cromo+con+hueso+de+aceituna#0>
- Rojas, S. M., & Antonio, J. (2008). *Calidad del sistema hídrico de Bogotá*.
- Sevilla, U. (2011). Manual del carbón activo. *Aula. aguapedia.org*, 1–89. Retrieved from http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBÓN_ACTIVADO_DEFINITIVOtar.pdf
- TableCurve 2D by Systat Software. (2014). Retrieved September 19, 2014, from <http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>