



Remoción de mercurio en lixiviados de un relleno sanitario empleando carbón activado impregnado con azufre¹

María Fanny Ocampo Barrero², Adela Londoño Carvajal³,
Gloria Inés Giraldo Gómez⁴, Nancy Rocío Sanabria González⁵

Leachate mercury removal in landfill using activate carbon impregnated in sulfur

Remoção de mercúrio em lixiviados de um aterro sanitário usando carvão ativado impregnado com enxofre

RESUMEN

Introducción. Los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda, de Manizales (Colombia) presentan una elevada concentración de mercurio, el cual es un metal altamente tóxico para la salud humana y de los ecosistemas. La adsorción de mercurio en solución sobre carbón activado es un método eficiente para su remoción, y la modificación de la superficie del carbón activado con azufre mejora la capacidad de adsorción de este metal en medio acuoso. **Objetivo.** Evaluar la remoción de mercurio presente en los lixiviados de un relleno sanitario empleando carbón activado impregnado con azufre. **Materiales y métodos.** Se realizó una caracterización fisicoquímica básica al lixiviado y al carbón activado impregnado con disulfuro de carbono (CA-CS₂). Se analizó la influencia del pH, tiempo de contacto y dosis CA-CS₂ sobre la remoción de mercurio presente en los lixiviados. **Resultados.** El lixiviado presentó una concentración de mercurio 316,15±10,42 µg/L y, a pH de 8,0, el CA-CS₂ logró una remoción promedio de mercurio del 44,76±1,39 %. La impregnación del carbón activado con CS₂ con respecto al CA incrementó la remoción de mercurio presente en el lixiviado entre un 21,29 y 38,66 % en el rango de pH evaluado. Los datos de la isoterma de adsorción se ajustaron al modelo de Langmuir y se obtuvo una

¹ Artículo original derivado del proyecto de investigación "Estudio de remoción de mercurio de aguas residuales provenientes de un relleno sanitario" financiado por la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (DIMA, proyecto 10658) entre los años 2010-2013.

² Ingeniera química, magíster en Ingeniería Química, coordinadora del Laboratorio de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. ORCID: 0000-0002-4657-3803

³ Ingeniera química, especialista en Ingeniería Ambiental, profesora asociada del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. ORCID: 0000-0003-3574-0597

⁴ Administradora de empresas, tecnóloga química, especialista en Administración y Evaluación de Proyectos Agropecuarios y Agroindustriales, especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos, doctora en Ciencias-Química, profesora asociada del Departamento de Física y Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. ORCID: 0000-0002-8995-4987

⁵ Ingeniera química, magíster en Ciencias-Química, doctora en Ciencias-Química, profesora asociada del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. ORCID: 0000-0002-4081-4004

capacidad de adsorción de mercurio de $24,65 \pm 1,46$ $\mu\text{g/g}$ de CA-CS₂. **Conclusiones.** La modificación del carbón activado mediante impregnación con azufre mostró un incremento en la capacidad de adsorción

de mercurio en los lixiviados de un relleno sanitario.

Palabras clave: adsorción, carbón activado, mercurio, lixiviado.

ABSTRACT

Introduction. La Esmeralda landfill leachate, Manizales, (Colombia), has a high mercury concentration, which is a highly toxic metal for both human health and ecosystems. Mercury adsorption in solution upon activated carbon is an efficient method for its removal, and the modification of activated carbon surface with sulfur improves the adsorption capacity of this metal in aqueous means. **Objective.** To evaluate the mercury removal present in landfill leachate using activated carbon impregnated in sulfur. **Materials and methods.** A basic physical chemical characterization to leachate and activated carbon impregnated with disulphide carbon (CA-CS₂) was made. The influence of pH, contact time and doze of CA-CS₂ upon mercury

removal present in leachate was analyzed. **Results.** The leachate presented a mercury concentration $316,1510,42$ $\mu\text{g/L}$ and, to pH of 8,0, the CA-CS₂ achieved an average mercury removal of $44,761,39$ %. The impregnation of activated carbon with CS₂ regarding the CA increased the mercury removal present in leachate between 21.29 and 38.66% in pH range evaluated. Data of adsorption isothermal were adjusted to Langmuir model and an adsorption capacity of mercury of $24.651.46$ $\mu\text{g/g}$ of CA-CS₂ was obtained. **Conclusions.** The modification of activated carbon by means of sulfur impregnation showed an increase of the mercury adsorption capacity in landfill leachate.

Key words: adsorption, activated carbon, mercury, leachate.

RESUMO

Introdução. Os lixiviados do aterro sanitário *La Esmeralda*, de Manizales (Colômbia) apresentam uma elevada concentração de mercúrio, o qual é um metal altamente tóxico para a saúde humana e dos ecossistemas. A adsorção de mercúrio em solução sobre carvão ativado é um método eficiente para sua remoção, e a modificação da superfície do carvão ativado com enxofre melhora a capacidade de adsorção deste metal em meio aquoso. **Objetivo.** Avaliar a remoção do mercúrio presente nos lixiviados de um aterro sanitário usando carvão ativado impregnado com enxofre. **Materiais e métodos.** Realizou-se uma caracterização físicoquímica básica ao lixiviado e ao carvão ativado impregnado com sulfureto de carbono (CA-CS₂). Se analisou a influência del pH, tempo de contato e dose

CA-CS₂ sobre a remoção do mercúrio presente nos lixiviados. **Resultados.** O lixiviado apresentou uma concentração de mercúrio $316,15 \pm 10,42$ $\mu\text{g/L}$ e, a pH de 8,0, o CA-CS₂ conseguiu uma remoção média do mercúrio de $44,76 \pm 1,39$ %. A impregnação do carvão ativado com CS₂ com respeito ao CA incrementou a remoção de mercúrio presente no lixiviado entre um 21,29 e 38,66 % na faixa de pH avaliado. Os dados da isoterma de adsorção se ajustaram ao modelo de Langmuir e se obteve uma capacidade de adsorção de mercúrio de $24,65 \pm 1,46$ $\mu\text{g/g}$ de CA-CS₂. **Conclusões.** A modificação do carvão ativado mediante impregnação com enxofre mostrou um incremento na capacidade de adsorção de mercúrio nos lixiviados de um aterro sanitário.

Palavras chave: adsorção, carvão ativado, mercúrio, lixiviado.

INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios constituyen la alternativa técnica, económica y ambiental más empleada para la disposición final de los residuos sólidos urbanos al nivel mundial (Renoua, Givaudan, Poulain, Dirassouyan y Moulin, 2008). Una desventaja de los rellenos sanitarios es la generación de lixiviados, los cuales corresponden al efluente acuoso producido por la percolación del agua lluvia a través de los residuos y los procesos bioquímicos de transformación de los mismos. Los metales comúnmente encontrados en los lixiviados corresponden a hierro, manganeso, zinc, cromo, plomo, cobre, níquel, bario, cadmio y mercurio; este último es uno de los de mayor toxicidad para el ecosistema (Kjeldsen, Barlaz, Rooker, Baun, Ledin y Christensen, 2002; Reinhart, 1993). La mayoría de compuestos de Hg(I) son poco solubles en agua y se encuentran principalmente en suelos y sedimentos. En contraste, el Hg(II) forma complejos o compuestos con especies orgánicas e inorgánicas dependiendo del ambiente químico, siendo los compuestos clorados de Hg(II) y el metilmercurio (CH_3Hg^+) muy solubles en agua (Leopold, Foulkes y Worsfold, 2010).

Para reducir la concentración de Hg(II) en soluciones acuosas se han empleado diversos procesos físicos, químicos y biológicos, entre ellos: coagulación, precipitación, intercambio iónico, separación con membrana, osmosis inversa y adsorción (Esmaili, Saremnia y Kalantari, 2015; Henneberry, Kraus, Fleck, Krabbenhoft, Bachand y Horwats, 2011; Oehmen, Vergel, Fradinho, Reis, Crespo y Velizarov, 2014). De los procesos anteriores, la adsorción sobre carbón activado ha demostrado ser un método eficiente para la remoción de mercurio, aplicable a gran escala y de bajo costo (Silva, Ruiz, Granados y Santángelo, 2010). La adsorción de las diferentes especies de mercurio depende de los agentes activantes en la superficie del carbón, siendo el cloro y el azufre los elementos más importantes en la captura de este metal (Huggins, Huffman, Dunham y Senior, 1999). En general, la sulfuración del carbón activado tiene un efecto benéfico en la adsorción de Hg(II), no obstante, el tipo de agente y el método de sulfuración afectan el grado de adsorción (Rivera-Utrilla, Sánchez-Polo, Gómez-Serrano, Álvarez, Alvim-Ferraz y Dias, 2011).

Basados en las propiedades del carbón activado y las características ácidas de las especies de mercurio en solución, en este trabajo se impregnó un carbón activado con CS_2 y se empleó como adsorbente para la remoción de mercurio presente en los lixiviados de un relleno sanitario. Asimismo, se realizó una

caracterización al carbón activado modificado y se analizó la influencia de las variables de operación (pH, tiempo de contacto y dosis de carbón activado) sobre la capacidad de adsorción del mercurio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos

Todos los reactivos utilizados para la cuantificación del mercurio fueron grado analítico. El agua utilizada fue destilada y desionizada. El carbón activado empleado fue de origen vegetal, de fabricación nacional, con forma granular y tamaño medio de partícula entre 1,0 y 1,4 mm (malla 14/18). Para la sulfuración del carbón se utilizó disulfuro de carbono (CS_2 , Merck, > 99,9).

Caracterización del lixiviado

La muestra compuesta de lixiviado se tomó a la salida del sistema de tratamiento anaerobio del relleno sanitario La Esmeralda, ubicado en la ciudad de Manizales-Caldas (Colombia), teniendo la precaución de no airearla. Posteriormente, se llevó al laboratorio para la caracterización fisicoquímica y se le determinaron los siguientes parámetros: pH, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración de los metales plomo, zinc, níquel y mercurio, siguiendo la metodología establecida por el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF, 2005). La muestra fue preservada mediante congelación a -18°C . La cuantificación de mercurio en los lixiviados se llevó a cabo con un espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer 3110) con accesorio para generación de vapor frío (Ocampo-Barrero, Londoño-Carvajal, Giraldo-Gómez y Sanabria-González, 2016).

Preparación y caracterización del carbón activado impregnado con azufre

Para incrementar la selectividad del carbón activado (CA) hacia el mercurio, este se impregnó con azufre mediante contacto con disulfuro de carbono (CS_2) durante 24 horas a temperatura ambiente, en una relación 1:1 masa a volumen y luego se secó a 50°C durante 12 horas. El carbón activado impregnado con azufre se simboliza como CA- CS_2 . El adsorbente se caracterizó mediante adsorción-desorción de nitrógeno a 77 K (Micromeritics ASAP 2030) y con la información de la isoterma se determinó el área superficial específica BET y el tamaño de

poro. La cantidad de azufre impregnado sobre el carbón activado se evaluó empleando el método ASTM D3177-02 (American Society for Testing and Materials, 2007).

Ensayos de adsorción

Con el fin de establecer las mejores condiciones para la remoción de mercurio, se evaluó la influencia de las variables pH, tiempo de contacto y dosis de adsorbente. Todos los ensayos de adsorción se realizaron en botellas de vidrio Winkler, las cuales se mantuvieron en un baño termostataado marca Selecta (Modelo Unitronic OR) a temperatura constante ($25 \pm 0,1$ °C) y agitación de 150 rpm. El porcentaje de remoción de mercurio se calculó mediante la ecuación 1:

$$\text{Remoción de mercurio (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) * 100 \text{ Ecuación (1)}$$

donde C_0 y C_f son las concentraciones inicial y final de mercurio disuelto ($\mu\text{g/L}$), respectivamente. Todos los ensayos de adsorción se realizaron por triplicado y los valores presentados corresponden al promedio de las mediciones.

El pH inicial del lixiviado fue ajustado a los valores de 6,0, 7,0, 8,0 y 9,0 unidades, mediante la adición de H_2SO_4 1,0 M o NaOH 4,0 M. El rango de pH analizado fue seleccionado con base en la literatura (Anoop-Krishnan y Anirudhan, 2002). Para cada ensayo de pH se emplearon 100 mL de lixiviado al pH preestablecido y 1,0 g de carbón activado (con y sin impregnar con CS_2). Las muestras se agitaron durante una hora y luego se filtraron en una membrana de 0,45 μm . El líquido clarificado fue sometido a digestión ácida para cuantificar la concentración de mercurio disuelto.

Para la determinación del tiempo óptimo de contacto, se utilizaron 5 muestras de 100 mL de lixiviado con 1,0 g de CA- CS_2 cada una. Las muestras se agitaron, y a intervalos de tiempo establecidos (5, 15, 30, 60 y 120 minutos) se tomaron alícuotas de 25 mL, las cuales se filtraron en una membrana de 0,45 μm , y al líquido clarificado se le midió la concentración de mercurio.

Para la determinación de la dosis de adsorbente, se utilizaron 4 muestras de 100 mL de lixiviado y una masa establecida de carbón activado impregnado con azufre (0,5, 1,0, 2,0 y 3,0 g). Las muestras se agitaron durante una hora y posteriormente se trataron de forma similar que en la determinación del tiempo de contacto.

Para la elaboración de la isoterma de adsorción, se emplearon 8 muestras de 100 mL de lixiviado con diferente contenido de mercurio, logrado mediante dilución con agua destilada. A las muestras no se les modificó el pH y se les adicionó la dosis óptima de CA- CS_2 , determinada en el ensayo anterior. Las muestras se agitaron durante 4 horas en un baño con temperatura controlada a $25 \pm 0,1$ °C, y posteriormente se cuantificó la concentración de mercurio en equilibrio. En la literatura se reporta que la adsorción de Hg(II) en solución acuosa sobre carbón activado sulfurado se alcanza entre 1 y 4 horas (Anoop-Krishnan y Anirudhan, 2002; Namasivayam y Kadirvelu, 1999); por tanto, se estableció el tiempo de equilibrio en 4 horas. Adicionalmente, tiempos de equilibrio mayores pueden generar degradación de la materia orgánica presente en el lixiviado e interferir en la remoción de este metal.

RESULTADOS

Caracterización del lixiviado

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del lixiviado fueron: pH $8,03 \pm 0,05$, DQO $7379,2 \pm 61,9$ mg/L, plomo $2,40 \pm 0,02$ mg/L, zinc $2,56 \pm 0,04$ mg/L, níquel $2,40 \pm 0,03$ mg/L y mercurio $316,15 \pm 10,42$ $\mu\text{g/L}$.

Caracterización del carbón activado

El carbón activado comercial presentó un área superficial específica de 723,2 m^2/g , y después de la impregnación con CS_2 esta disminuyó a 715,4 m^2/g , en tanto que el tamaño de poro permaneció prácticamente constante en 2,57 nm. El contenido de azufre en el carbón activado pasó de 0,01 % a 1,25 % en masa después de impregnación con CS_2 .

Adsorción de mercurio

En la tabla 1, se muestran los resultados obtenidos para la remoción de mercurio en la muestra de lixiviado a diferentes valores de pH. La impregnación del carbón activado con CS_2 incrementó la remoción de mercurio presente en el lixiviado entre un 21,29 y 38,66 % con respecto al CA, lo cual confirma que la sulfuración del carbón activado tiene un efecto benéfico sobre la adsorción de mercurio en solución. Dado que el pH original del lixiviado se encuentra alrededor de 8,0 y que a este valor de pH se obtuvo la mayor diferencia en la remoción de mercurio entre el CA y el CA- CS_2 , se decidió no modificar el pH de la muestra para los ensayos siguientes.

Tabla 1. Efecto del pH en la remoción de mercurio en el lixiviado

pH	Concentración de Hg ($\mu\text{g/L}$)	Remoción de mercurio (%)	
		CA	CA-CS ₂
6,0	317,85 \pm 15,85	40,31 \pm 1,03	48,89 \pm 1,96
7,0	313,43 \pm 10,11	38,24 \pm 1,42	49,15 \pm 1,72
8,0	316,15 \pm 10,42	32,28 \pm 1,16	44,76 \pm 1,39
9,0	280,20 \pm 9,52	37,74 \pm 2,01	48,87 \pm 2,19

Fuente: elaboración por los autores

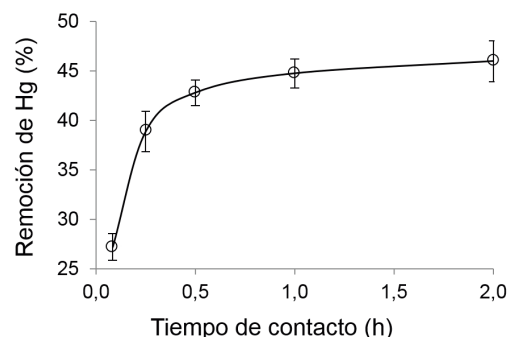
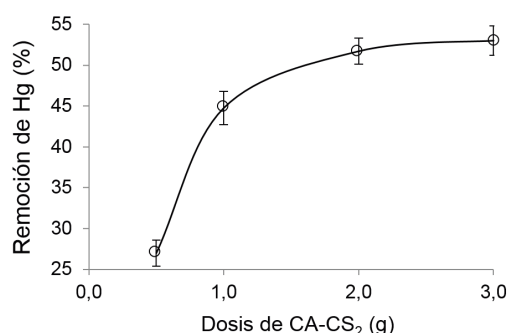
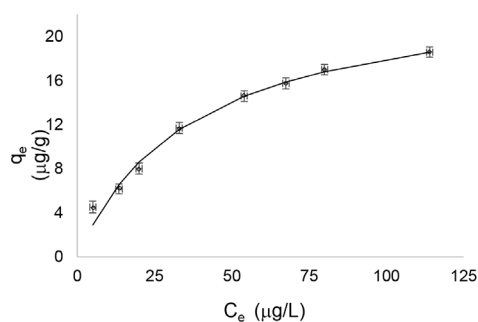
En la figura 1 se observa el comportamiento de la remoción de mercurio en el lixiviado empleando CA-CS₂ en función del tiempo de contacto. El tiempo óptimo de contacto del adsorbente con el lixiviado fue de una hora, alcanzando una remoción promedio del 45 %, la cual permaneció prácticamente constante hasta el final del ensayo.

En la figura 2, se aprecia la variación en la remoción de mercurio en función de la dosis de adsorbente. La dosis óptima de CA-CS₂ fue de 2,0 g/100 mL para remover en promedio el 52 % del mercurio presente en el lixiviado. Dosis superiores a 2,0 g de CA-CS₂ no mejoran considerablemente la remoción de mercurio, puesto que las especies de este metal tienden a distribuirse tanto en fase disuelta como en el material particulado, relación conocida como coeficiente de partición (Ocampo-Barrero et al., 2016).

El estudio de la isoterma de adsorción es útil para determinar la capacidad máxima de adsorción de mercurio para el adsorbente dado. Cuando se emplean concentraciones bajas de mercurio en el lixiviado se logran remociones cercanas al 80 %, en tanto que a concentraciones superiores de mercurio la remoción está alrededor del 60 %. Los datos de la isoterma de adsorción de mercurio en el lixiviado sobre CA-CS₂ (figura 3) se ajustaron al modelo de Langmuir, el cual está descrito por la ecuación 2:

$$q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde q_e es la cantidad de mercurio en el equilibrio ($\mu\text{g Hg/g CA-CS}_2$), C_e es la concentración de mercurio en el equilibrio ($\mu\text{g/L}$) y Q_0 y b son las constantes de Langmuir relacionadas con la capacidad de adsorción y la energía de adsorción. El ajuste por regresión no lineal de los datos de q_e y C_e se realizó en el programa OriginPro® y los parámetros obtenidos fueron = 24,65 \pm 1,46 $\mu\text{g/g}$, = 2,7(\pm 0,3) $\times 10^{-2}$ (L/ μg) y $R^2 = 0,98$.

**Figura 1. Efecto de tiempo de contacto en la remoción de mercurio en el lixiviado****Figura 2. Efecto de la dosis de adsorbente en la remoción de mercurio en el lixiviado****Figura 3. Isotherma de adsorción de mercurio presente en el lixiviado sobre CA-CS₂**

La isoterma de Langmuir se puede expresar en términos de una constante adimensional denominada factor de separación o parámetro de equilibrio, R_L (Hall, Eagleton, Acrivos y Vermeulen, 1966), definido por la ecuación 3:

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \text{Ecuación (3)}$$

donde C_0 es la concentración inicial del metal ($\mu\text{g/L}$) y b es la constante de Langmuir ($\text{L}/\mu\text{g}$). Los valores de R_L oscilan entre 0,11 y 0,43, indicando que la adsorción es favorable ($0 < R_L < 1$) (Hall et al., 1966; Namasivayam y Kadirvelu, 1999).

DISCUSIÓN

El pH básico de la muestra se asocia a lixiviados provenientes de un relleno en fase metanogénica (pH entre 7,5 y 9,0), en tanto que la DQO se encuentra en el rango de 6000 a 60.000 mg/L, característico de un relleno en fase ácida (Ehrig, 1983; Kjeldsen et al., 2002). De los metales analizados, el plomo, el níquel y el mercurio se consideran sustancias de interés sanitario, y se encuentran en concentración superior al límite establecido para vertimiento a cuerpos de agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

La impregnación del carbón activado con CS_2 produjo cambios leves en las propiedades texturales del carbón activado (solo disminuyó en 1 % el área superficial específica), debido a la baja incorporación de azufre en el sólido. El área superficial específica del carbón impregnado con azufre es ligeramente superior que la reportada para materiales similares (Anoop-Krishnan y Anirudhan, 2002; Mohan, Gupta, Srivastava y Chander, 2001). Mediante la impregnación con CS_2 , se ha logrado incrementar el contenido de azufre en un carbón activado hasta el 4,1 % en masa (Silva et al., 2010), valor superior al obtenido en este trabajo. Las diferencias en área superficial específica y cantidad de azufre impregnado en el carbón activado se asocian a las características químicas de la superficie del carbón (Anoop-Krishnan y Anirudhan, 2002).

El análisis de varianza al 95 % de confianza mostró que el adsorbente tiene influencia significativa sobre la remoción del mercurio, pero el pH en el rango

evaluado no presentó un efecto significativo. A pH de 9,0 la concentración de especies de mercurio disueltas en el lixiviado disminuyó, debido a que, en este pH, el Hg(II) en solución puede precipitar como Hg(OH)_2 (Ocampo-Barrero et al., 2016). El CA- CS_2 logró una remoción de mercurio en el lixiviado mayor que el CA en el rango de pH de 6,0 a 9,0. Este resultado se asocia con el carácter ácido de las especies de mercurio en solución, las cuales tienden a formar enlaces fuertes con los grupos RS y SH (Namasivayam y Kadirvelu, 1999; Zhu, Deng, Yang y Gang, 2009).

En ensayos de remoción de mercurio realizados con un agua residual doméstica (DQO de 250 mg/L y pH igual a 8,0), a la cual se adicionó una concentración de $315,10 \pm 10,42 \mu\text{g/L}$ de mercurio, se obtuvo una remoción $64,40 \pm 3,66$ y $90,68 \pm 4,87\%$, empleando el CA y CA- CS_2 , respectivamente. Este resultado corrobora que el proceso de sulfuración en el carbón activado mejora la capacidad de adsorción del mercurio, y que el contenido de materia orgánica en el lixiviado interfiere en la remoción de este metal.

Para muestras de agua residuales diferentes a lixiviados, se ha encontrado que cuando se incrementa la dosis de adsorbente a pH constante, se aumenta la remoción del compuesto de interés (Gupta, Gupta, Rastogi, Agarwal y Nayak, 2011; Hadi, To, Hui, Lin y McKay, 2015). Sin embargo, en los lixiviados del relleno sanitario el comportamiento es diferente, por cuanto en la muestra existen sólidos suspendidos y el mercurio establece un equilibrio entre la cantidad disuelta y la asociada al material particulado (Ocampo-Barrero et al., 2016).

La capacidad de adsorción de mercurio (Q_0) por parte del CA- CS_2 presentó un valor bajo comparado con los reportados para adsorción de Hg(II) en solución a 30°C en carbones similares modificados con azufre, cuyo rango varía de 172,4 a 188,7 mg/g (Anoop-Krishnan y Anirudhan, 2002). La diferencia entre estos resultados se asocia a la complejidad del lixiviado, pues este contiene una elevada concentración de materia orgánica y otros elementos metálicos como plomo, zinc, hierro y níquel, los cuales también pueden ser adsorbidos por el carbón activado. En ensayos con muestras de lixiviado que no se incluyeron en este trabajo, el CA- CS_2 alcanzó una remoción promedio del $14,30 \pm 0,91$ % de plomo, $25,02 \pm 1,50$ % de zinc y $18,83 \pm 1,22$ % de níquel.

CONCLUSIONES

La modificación de la superficie del carbón activado mediante impregnación con azufre mostró un incremento en la capacidad de adsorción de mercurio en solución.

La elevada concentración de materia orgánica y otras sustancias presentes en los lixiviados del relleno sanitario son la mayor interferencia y / o competencia para la baja adsorción de mercurio en el carbón activado impregnado con azufre (remoción promedio del 45 % a pH igual a 8,0).

Los datos experimentales de adsorción de mercurio por parte del carbón activado impregnado con CS_2 se ajustaron bien al modelo de Langmuir ($R^2 = 0,98$) y, aunque se obtuvo una baja capacidad de adsorción en equilibrio (de $24,65 \pm 1,46 \mu\text{g/g}$), el proceso fue favorable ($0 < R_L < 1$).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, por el apoyo financiero para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- Anoop-Krishnan, K. & Anirudhan, T. S. (2002). Removal of mercury(II) from aqueous solutions and chlor-alkali industry effluent by steam activated and sulphurised activated carbons prepared from bagasse pith: kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 92(2), 161-183.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation -APHA; AWWA y WEF- (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Washington D. C.: American Water Works Association.
- American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM D 348 3177-02 - Standard test methods for total sulfur in the analysis sample of coal and coke. Washington D.C.
- Ehrig, H.-J. (1983). Quality and quantity of sanitary landfill leachate. *Waste Management & Research*, 1(1), 53-68.
- Esmaeili, A.; Saremnia, B. & Kalantari, M. (2015). Removal of mercury(II) from aqueous solutions by biosorption on the biomass of *Sargassum glaucescens* and *Gracilaria corticata*. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(4), 506-511.
- Gupta, V.K.; Gupta, B.; Rastogi, A.; Agarwal, S. & Nayak, A. (2011). A comparative investigation on adsorption performances of mesoporous activated carbon prepared from waste rubber tire and activated carbon for a hazardous azo dye-Acid Blue 113. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 891-901.
- Hadi, P.; To, M.-H.; Hui, C.-W.; Lin, C. S. K & McKay, G. (2015). Aqueous mercury adsorption by activated carbons. *Water Research*, 73, 37-55.
- Hall, K. R.; Eagleton, L. C.; Acrivos, A. & Vermeulen, T. (1966). Pore- and solid-diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant-pattern conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 5(2), 212-223.
- Henneberry, Y. K.; Kraus, T. E. C.; Fleck, J. A.; Krabbenhoft, D. P.; Bachand, P.M. & Horwath, W. R. (2011). Removal of inorganic mercury and methylmercury from surface waters following coagulation of dissolved organic matter with metal-based salts. *Science of The Total Environment*, 409(3), 631-637.
- Huggins, F. E.; Huffman, G. P.; Dunham, G. E. & Senior, C. L. (1999). XAFS examination of mercury sorption on three activated carbons. *Energy & Fuels*, 13(1), 114-121.
- Kjeldsen, P.; Barlaz, M.A.; Rooker, A. P.; Baun, A.; Ledin, A. & Christensen, T.H. (2002). Present and long - term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 32(2), 297-336.
- Leopold, K.; Foulkes, M. & Worsfold, P. (2010). Methods for the determination and speciation of mercury in natural waters—A review. *Analytica Chimica Acta*, 663(2), 127-138.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá - República de Colombia.

- Mohan, D.; Gupta, V. K.; Srivastava, S. K. & Chander, S. (2001). Kinetics of mercury adsorption from wastewater using activated carbon derived from fertilizer waste. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 177(2-3), 169-181.
- Namasivayam, C. & Kadirvelu, K. (1999). Uptake of mercury (II) from wastewater by activated carbon from an unwanted agricultural solid by-product: coirpith. *Carbon*, 37(1), 79-84.
- Ocampo-Barrero, M. F.; Londoño-Carvajal, A.; Giraldo-Gómez, G. I. & Sanabria-González, N. R. (2016). Coeficientes de partición de mercurio en lixiviados del relleno sanitario La Esmerlada. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(1), 56-65.
- Oehmen, A.; Vergel, D.; Fradinho, J.; Reis, M. A. M.; Crespo, J. G. & Velizarov, S. (2014). Mercury removal from water streams through the ion exchange membrane bioreactor concept. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 65-70.
- Reinhart, D. R. (1993). A review of recent studies on the sources of hazardous compounds emitted from solid waste landfills: A U. S. experience. *Waste Management & Research*, 11(3), 257-268.
- Renoua, S.; Givaudan, J. G.; Poulain, S.; Dirassouyan, F. G. & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468-493.
- Rivera-Utrilla, J.; Sánchez-Polo, M.; Gómez-Serrano, V.; Álvarez, P. M.; Alvim-Ferraz, M. C. M. & Dias, J. M. (2011). Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3), 1-23.
- Silva, H. S.; Ruiz, S. V.; Granados, D. L. & Santángelo, J. M. (2010). Adsorption of mercury (II) from liquid solutions using modified activated carbons. *Materials Research*, 13(2), 129-134.
- Zhu, J.; Deng, B.; Yang, J. & Gang, D. (2009). Modifying activated carbon with hybrid ligands for enhancing aqueous mercury removal. *Carbon*, 47(8), 2014-2025.