

Modelación de sistemas de eliminación de olores ofensivos generados por H₂S en aguas residuales mediante adsorción con carbón activado

Modeling offensive odor removal systems generated by H₂S on wastewater using activated carbon adsorption

Juan Jose Arrieta Lozano 

Empresa Triple AAA ESP,

Colombia

Open Access

Recibido:

12 de abril de 2018

Aceptado:

19 julio de 2018

Publicado:

11 diciembre de 2018

Correspondencia:

juan_josearrieta@yahoo.es

DOI:

<https://doi.org/10.17081/invinno.7.1.3020>



Resumen

Objetivo: Divulgar a los profesionales del área los modelos y metodología que se siguen para un correcto diseño de sistemas de control de olores por H₂S en aguas residuales. **Metodología:** En primer lugar, se elaboró una recopilación amplia de publicaciones científicas recientes sobre el tema; luego se presentó la metodología de diseño y una aplicación práctica del tema. **Resultados:** Tras revisar la literatura sobre el tema, se estableció que el modelo más ajustado para la adsorción de H₂S mediante carbón activado corresponde al modelo de Zhang y Cheng (2000). **Conclusiones:** Mediante este trabajo se establecieron las consideraciones técnicas necesarias para el dimensionamiento de sistemas de remoción de olores por H₂S debido a aguas residuales utilizando carbón activado.

Palabras claves: Carbón activado, adsorción, sulfuro de hidrogeno, control de olores, aguas residuales.

Abstract

Objective: Disclose to the professionals of the area the models and methodology that are followed for a correct design of odor control systems by H₂S in wastewater. **Methodology:** The study was prepared by making a broad compilation of recent scientific publications on the subject, then the design methodology and a practical application of the theme is shown. **Results:** In the literature on the subject it could be established that the most adjusted model for the adsorption of H₂S by activated carbon corresponds to the model of Zhang and Cheng (2000). **Conclusions:** Through this work it is possible to establish the necessary technical considerations for the sizing of odor removal systems by H₂S due to wastewater using activated carbon.

Keywords: Activated carbon, adsorption, hydrogen sulfide, odor control, Wastewater.

Introducción

La generación de malos olores debido a la evacuación de aguas residuales municipales es inherente al sistema, debido a que dichas aguas residuales poseen un alto contenido de materia orgánica y sulfatos. En condiciones anaerobias y de Ph bajo, contribuyen por ello al crecimiento de bacterias reductoras del sulfato, las cuales degradan la materia orgánica para producir energía usando los sulfatos como agente oxidante, lo que produce Sulfuro de Hidrogeno (H₂S).

El sulfuro de hidrogeno, también llamado ácido sulfhídrico, es un gas más pesado que el aire (1.36 Kg/m³), y cuando está mezclado con aire (4-46%) es inflamable, incoloro, y puede ser tóxico para el ser humano en concentraciones mayores de 20 ppm. También es odorífero, de modo que el olfato humano lo detecta en concentraciones de 0.02-0.13 ppm: su olor es el de materia orgánica en descomposición, como el de huevos podridos [1, 2].

Son muy frecuentes las quejas de las comunidades ante las entidades municipales prestadoras de servicio de alcantarillado, ya que, en estaciones elevadoras y en plantas de tratamiento de aguas residuales, las concentraciones de H₂S superan con creces los valores detectables por el ser humano. De hecho, mediciones recolectadas en la presente investigación muestran promedios de 9 ppm y máximos de 50 ppm en una estación elevadora de aguas residuales de tamaño pequeño (20 lps), esto es, de 70 a 385 veces más que el valor perceptible de concentración de ácido sulfhídrico. Cabe decir que en Colombia la resolución 1541 de noviembre de 2013 establece umbrales para sustancias generadoras de olores ofensivos, y que para el sulfuro de hidrógeno el umbral corresponde a 7.0 µg/m³ por 24 hora de exposición y 30 µg/m³(0.02ppm) por hora de exposición a condiciones de referencia (25°C-1 atm) .

En este contexto, el presente artículo registra un resumen de los sistemas usuales empleados para remoción de H₂S, así como consideraciones técnicas, modelos matemáticos y aspectos necesarios para la remoción de H₂S, según investigaciones realizadas por diversos autores. Luego profundiza en la remoción mediante adsorción química con Carbón Activado, que es el eje central del presente trabajo.

El objetivo principal es plantear un procedimiento de diseño de un sistema de remoción de olores causados por H₂S en sistemas de evacuación y disposición de aguas residuales municipales mediante adsorción química, usando Carbón Activado. Todo ello a partir de una revisión bibliográfica realizada sobre el tema.

Revisión literaria

Los principales mecanismos para remoción de H₂S se basan en procesos fisicoquímicos y biológicos, los mismos se pueden resumir de la siguiente manera:

Mecanismos físicos: condensación, adsorción, dilución, membranas, enmascaramiento [2].

Mecanismos químicos: Combustión, precipitación química, plasma, oxidación [2].

Mecanismos biológicos: Bio-filtración, bio-lavador, contactores rotativos biológicos, filtración por goteo, bio-reactores fotoquímicos, bio-reactores de membrana y bio-reactores de lecho suspendido [2].

Ahora bien, los sistemas de control de olores por H₂S que pueden conseguirse en el mercado son:

Sistema de control de olores por carbón activado. (Existen en el mercado productos de diversas marcas, tales como CENTAUR, PURAFIL, CABOT, entre otros).

Sistema de control de olores por biofiltros inorgánicos o sintéticos. (Patentados, existen en el mercado productos de diversas marcas como BIOREN, entre otros).

Sistema de control de olores por biofiltros.

Sistema de control de olores por Ozono O₃.

Sistema de control de olores por compuesto químicos como peróxido de hidrogeno (Agua Oxigenada-H₂O₂).

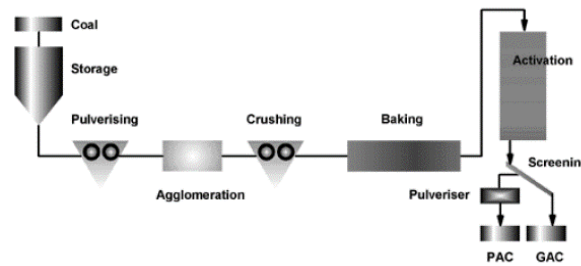
De estos mecanismos de remoción se resalta el uso de biofiltros, sobre los cuales vale la pena un mayor estudio, de modo que se puedan definir parámetros de diseño para su aplicación en el campo de la ingeniería. En las referencias [2,3] se aborda el tema en detalle y se muestran experiencias realizadas en Colombia y el mundo. “La biofiltración consiste en forzar el paso de efluentes gaseosos contaminados a través de un medio poroso, en el cual se desarrollan microorganismos que degradan los diferentes compuestos químicos presentes” [2]. Como medio de soporte biológico bacteriano, se utilizan compost, madera, bagazo de caña de azúcar [3], entre otros, las cuales generan eficiencias de remoción mayores de 99% [2].

Remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) mediante adsorción con carbón activado

Carbón activado

El carbón activado consiste en carbonizar material vegetal sólido en ausencia de aire, tales como cáscara de coco, a altas temperaturas entre 400-1000 °C, y luego someterlo a un proceso de enfriamiento y activación con agua u otra sustancia química, normalmente alcalina, para aumentar la porosidad y, por ende, el área superficial. Un tercer paso consiste en impregnarlo con sustancias químicas causticas para mejorar las propiedades de adsorción [4]. Como resultado se obtiene un material con una gran área superficial porosa que cuenta con propiedades adsorbentes [5, 6].

Figura. 1. La Imagen Muestra esquemáticamente el proceso de producción de Carbón Activado Granular (GAC) y en polvo (PAC). Fuente: Google con ajustes de consultor



La remoción de olores debido a H₂S mediante carbón activado se produce por adsorción en su superficie, como se muestra en la siguiente reacción química [7]:



Existe una reacción no deseada que depende del precursor orgánico y que oscila entre 3-6% de dióxido de azufre (SO₂) [7].



Variables que afectan la capacidad de adsorción de H₂S del carbón activado

Tipo de carbón activado

Existen básicamente tres tipos de carbón activado que se usan para remoción de olores por H₂S: Carbón activado estándar, carbón activado Impregnado y carbón activado catalítico. Cada uno en su orden es más eficiente para remoción debido a que tienen un área superficial superior. Adicionalmente, en el caso del carbón impregnado [5] con compuestos causticos, este genera mayor capacidad de adsorción de ácidos como el ácido sulfhídrico (H₂S. CHOO) y otros [6]. Se sabe que para un carbón activado impregnado con carbonato de potasio K₂CO₃ se puede obtener 25 veces más capacidad de adsorción que para un carbón estándar.

Cantidad de carbón (Tamaño del lecho)

Choo y otros [6] muestran el desempeño del carbón activado estándar para la remoción de H₂S cuando se aplica una concentración del mismo de 2000 ppm a 30°C, y demuestran así que a mayor cantidad de carbón y, por ende, mayor tiempo de contacto aumenta la adsorción de sulfuro de hidrogeno.

Temperatura

CHOO y otros [6] muestran, además, que para un carbón activado impregnado, la capacidad de adsorción aumenta hasta que la temperatura llega a los 50°C; luego decrece su capacidad de adsorción.

Humedad relativa

Con el aumento de la humedad relativa del carbón activado se aumenta la capacidad de adsorción del H₂S [7, 4].

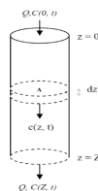
Otros factores relacionados con la producción/fabricación del carbón activado (CA) son:

Temperatura de pirólisis del CA [8], humedad del carbón en la activación (húmedo/seco)[7], contenido de sulfuros en el carbón activado [7], y edad del carbón [7]. Por lo anterior, se puede decir que la fabricación del carbón es determinante para establecer sus características de adsorción, por ello existen en el mercado diferentes marcas con sus propias características de adsorción.

Modelos de adsorción

Balance masas

Figura 2. Representación esquemática del volumen de control para equilibrio total en una columna de la adsorción. Q representa el flujo; A para el área seccionada transversalmente; z representa la longitud de la cama; c representa la concentración del gas, y t representa el tiempo.



Para establecer la ecuación de balance de masas del sistemas, la adsorción puede ser dividida en dos tipos, adsorción física y química. La primera se debe a las fuerzas de Van der Waals, y la adsorción química es la que ocurre cuando el adsorbato forma enlaces fuertes con el adsorbente, es decir, se dan reacciones químicas.

La ecuación de balance de masas para flujo a pistón puede escribirse de la siguiente manera:

Vel. Cambio de masa de soluto/Vol. Control= Entrada neta de soluto por advención + entrada neta de soluto por dispersión + Vel. Neta de perdida de soluto por adsorción física +- Vel. Neta de creación/destrucción del soluto por reacción química [9]:

$$\epsilon Adz \frac{\partial c}{\partial t} = -Q dz \frac{\partial c}{\partial z} + D \epsilon Adz \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz - dW \frac{\partial q}{\partial t} + \epsilon Adz r \quad (3)$$

Luego,

$$\epsilon Adz \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\epsilon Adz}{dt} dz \frac{\partial c}{\partial z} + D \epsilon Adz \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} dz - dW \frac{\partial q}{\partial t} + \epsilon Adz r \quad (4)$$

Donde, porosidad de la cama es la fracción vacía de la sección empacada de la columna, q es la concentración del H₂S en el carbón (g H₂S/g CA), D es considerado como el coeficiente de dispersión del soluto, y dW es la masa del soluto en un diferencial del volumen de control. Dividiendo por ϵAdz la ecuación y considerando el coeficiente dz/dt como la velocidad de flujo (U₀) [8, 9].

Existen, en todo caso, diversos modelos de adsorción desarrollados por autores como: Bohart y Adams Bohart, 1920; Clark, 1987; Thomas Model, Yoon and Nelson Model, Wolborska Model, y Zhang y Cheng, 2000 [9].

Para el presente trabajo se utilizó el modelo de Zhang y Cheng [10], considerando que [7] estableció que este modelo tiene el mejor ajuste entre todos los mencionados para la adsorción de H₂S con carbón activado.

Modelo de Zhang y Cheng

Este modelo considera, en principio, que la dispersión D en la transferencia de masa es insignificante. Lo cual arroja la siguiente ecuación:

Autores [9] realizaron respecto a él un desarrollo matemático completo, en el que se observa cómo se llega a la ecuación del modelo de Zhang y Cheng, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \rho_{abs} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{\partial q}{\partial t} + r \quad (5)$$

pad correspondiente a la densidad del carbón activado.

La ecuación respectiva será la utilizada en el presente trabajo [10]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - \rho_{abs} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{\partial q}{\partial t} + R \quad (6)$$

Al considerar la reacción de desactivación como una ecuación de primer orden, se tiene:

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} = K_d \emptyset \quad (7)$$

Y resolviendo:

$$\emptyset = e^{-K_d t} \quad (8)$$

Donde \emptyset es la función de desactivación, K_d es la constante de desactivación (s⁻¹) y t el tiempo de desactivación (s).

Para el carbón activado Impregnado la velocidad de la reacción R es:

$$R = KC\theta \quad (9)$$

$$R = KCe^{-K_d t} \quad (10)$$

Donde R es la constante de velocidad de reacción, C es la concentración (ppm) y K es la constante de la reacción de adsorción del carbón activado (s-1).

Para pequeñas concentraciones la adsorción física obedece a una línea isotérmica:

$$q = K_1 C \quad (11)$$

Donde K1= es la pendiente de la línea de adsorción física isotérmica (L Gas /g CA), y q es la concentración del H2S en el carbón (g H2S/g CA).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_1 \frac{\partial c}{\partial t} \quad (12)$$

Reemplazando R y resolviendo, Zhang y Cheng [10] obtuvieron la siguiente expresión:

$$\ln \ln \frac{C_0}{c} = \ln \frac{K}{[1 + K_1 \rho \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon}] K_d} - K_d t + \ln \left[e^{\frac{K_d [1 + K_1 \rho \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon}]}{u}} - 1 \right] \quad (13)$$

Simplificando,

$$\ln \ln \frac{C_0}{c} = \alpha - K_d t \quad (14)$$

$$\alpha = \ln \frac{K}{\alpha K_d} + \ln \left[e^{\frac{K_d \alpha x}{u}} - 1 \right] \quad (15)$$

$$\alpha = 1 + K_1 \rho \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} \quad (16)$$

La relación x/u puede ser sustituida por la relación V/Q, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\alpha = \ln \frac{K}{\alpha K_d} + \ln \left[e^{\frac{K_d \alpha V}{Q}} - 1 \right] \quad (17)$$

Siendo V el volumen del lecho de carbón y Q el caudal de aire a tratar.

El autor [7] realizó un trabajo de investigación sobre modelación de adsorción de H2S con carbón activado fabricado, a partir de residuos de digestión anaerobia de estiércol de ganado de una granja. La investigación fue realizada para limpiar el biogás obtenido en la misma granja estableciendo que los coeficientes cinéticos que gobiernan el modelo de Zhang y Cheng.

Para el desarrollo del presente trabajo, los valores de los coeficientes cinéticos del modelo son extraídos del trabajo de investigación de [7] y se muestran en la Tabla

1. Se enfatiza que los valores fueron establecidos para un tipo de carbón activado, que está suficientemente descrito en el trabajo, por lo que no puede ser generalizado a todos los carbones activados, dichos valores se muestran con fines académicos y, a la vez, se aclara que los mismos no pueden ser usados para fines de diseño definitivos. Quienes estén interesados en ello deberán establecer en laboratorio sus propios valores de coeficientes cinéticos o solicitar al fabricante del carbón que entregue dichos valores.

Tabla 1. Los valores de K_d., K y K_i=K₁. Fuente: Extraídos de [7]. Corresponden a los promedios de cada uno de los coeficientes establecidos en la Investigaciones.

Coefficiente Cinético	Valor
K _d [s ⁻¹]	5.469E-05
K [s ⁻¹]	1.797E+02
K _i [L Gas H ₂ S /g carbon]	1.459E+02

Una vez el carbón activado impregnado se recarga de azufre, se convierte en un producto de desecho peligroso el cual debe disponerse adecuadamente. Si es impregnado debe incinerarse, pues es altamente auto-ignicible [6, 7].

En las referencias [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] pueden observarse diferentes enfoques y consideraciones de modelación de absorción de olores los cuales fueron estudiados para la elaboración del presente trabajo.

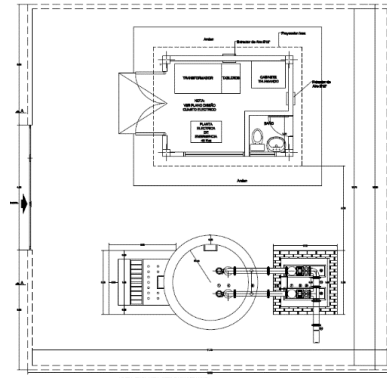
Metodología

Basados en el modelo de Zhang y Cheng antes mostrado, el procedimiento de diseño consiste en establecer el tiempo de vida útil del carbón activado, los coeficientes cinéticos, las concentraciones de entrada y salida y la relación ancho/largo, de modo que se cumpla la condición de flujo a pistón. El modelo deberá arrojar el tamaño del lecho requerido.

Resultados

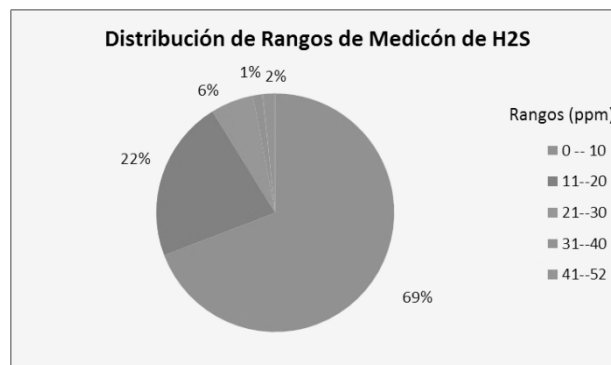
A continuación se muestra la implementación de la metodología de diseño para para una estación elevadora de aguas residuales a la cual se le realizó monitoreo de concentraciones de sulfuro de hidrogeno, y en la que se debía instalar un sistema de control de olores, ya que estaba afectando a los habitantes del sector.

Figura 3. La figura muestra la vista en planta de la estación elevadora en cuestión. Se observa la estación elevadora conformada por un pozo húmedo con rejillas de cribado, pozo húmedo de bombeo y registro de válvulas, también se observa la caseta eléctrica



El monitoreo a las concentraciones de H2S realizado en la estación fue el siguiente:

Figura 4. La figura muestra la distribución de los rangos de medición de H2S realizados durante 24 horas



Valor máximo: 50 ppm (6.96E-05 µg/l)

Tabla 2. Datos de entrada

DESCRIPCIÓN	VALOR
Volumen de espacio confinado de interés/Volumen de pozos húmedos de estación elevadora (L)	20.000
Tiempo en el cual se requiere ventilar volumen*, Seg. (12 Renovaciones/hora)	300
Concentración Máxima de sulfuro de Hidrogeno, gr/l	6.96E-05 gr/l
Concentración de salida de sistema de control de olores/Resolución 1541 de noviembre de 2013 (gr/l)	3.00E-08
Relación d/L para garantizar flujo a pistón.	1/3
Tiempo de desactivación del carbón, corresponde al tiempo para cambio o regeneración del lecho de adsorción. (Días).	7.5**

*Esta variable es de suma importancia ya que de ella depende el caudal de aire a tratar y por ende incide en el tamaño final del sistema, lo que al mismo tiempo incide en los costos. Los altos caudales, además de acarrear mayores costos de construcción y funcionamiento, también inciden en la generación de ruidos que pueden afectar a las comunidades vecinas del sistema (cabe anotar que las estaciones elevadoras de aguas residuales suelen estar ubicadas en sectores densamente poblados). Se han podido establecer experiencias en las que el ruido originado por los ventiladores de los sistemas de control de olores han incrementado las molestias a los habitantes. Para estaciones de bombeo de aguas residuales (EBAR), son preferibles pequeños caudales acompañados de mecanismos de medición en línea que controlen el sistema. Así se evitan niveles de concentración de H₂S que originen molestias o que sean peligrosos para los operadores de las EBAR.

** El tiempo de desactivación es una variable importante a establecer, toda vez que estos sistemas no trabajan de modo continuo sino intermitente. En consecuencia, este tiempo de desactivación corresponderá al tiempo real en el cual el sistema está encendido. Para nuestro caso, se supone que el sistema estará encendido durante 1 hora seis veces al día, entonces, para cambiar los lechos mensualmente, el tiempo corresponde a 6 horas diarias y a 180 horas mensuales.

Tabla 3. Características de lecho/carbón activado impregnado

DESCRIPCIÓN	VALOR
<i>K_d [s⁻¹]</i>	5.47E-05
<i>K [s⁻¹]</i>	1.80E+02
<i>K_i [L Gas H₂S/g CA]</i>	1.46E+02
Porosidad	0.25
Densidad del Carbón Activado, gr/l	400

Tabla 4. Resultados del modelo

DESCRIPCIÓN	VALOR
Volumen del Lecho de carbón, (l)	240
Diámetro de lecho, m	0.50
Profundidad de lecho, m	1.5
Capacidad de equipo de ventilacion/ventilador, cfm	141
Eficiencia de ventilador	0.62
Presión requerida*, Pulg. Columna de Agua(Pulg. Ca)	39"
Potencia de ventilador, HP	1.4
Potencia asumida final, HP	2

*La presión Requerida en el ventilador es una Variable muy compleja de establecer, por experiencia se puede asumir un valor entre 12.39 " (1-3 Ft).

Conclusiones y recomendaciones

Tras revisar la literatura sobre el tema, se estableció que el modelo más ajustado para la adsorción de H₂S mediante carbón activado es el de Zhang y Cheng [7].

Mediante este trabajo se han establecido, además, las consideraciones técnicas necesarias para el dimensionamiento de sistemas de remoción de olores por H₂S de aguas residuales, utilizando carbón activado.

Para dimensionar sistemas de control de olores por H₂S con carbón activado, es necesario establecer los coeficientes cinéticos del carbón activado, pues, debido a la variedad de productos que ofrece el mercado, no es posible generalizarlos. Esto hace muy difícil el trabajo de diseño por parte de los profesionales del área y restringe el mismo a los proveedores de productos y equipos reconocidos en el mercado.

El presente estudio permite establecer las bases y el modelo para optimizar los sistemas de control de olores existentes, dado que modela diferentes situaciones y condiciones de operación, realizando cambios a los parámetros y variables del sistema.

Es importante mencionar, sin embargo, que los proveedores de carbón activado para control de olores no entregan información técnica referida a coeficientes cinéticos, lo que imposibilita la modelación del proceso de adsorción. Algunos proveedores entregan valores de capacidad de adsorción de su producto en términos de porcentaje por peso (%) y gr de H₂S /cc de carbón, pero este dato no permite realizar la modelación del sistema y la estimación del volumen de carbón requerido. Más bien, el asunto se vuelve un proceso de prueba y error, y no es posible predecir el comportamiento del sistema.

Referencias bibliográficas

1. J.A. Romero- Rojas, *Purificación Del Agua*. Bogotá, Colombia. Editorial Escuela colombiana de ingeniería, 2000.
2. Y.C. Caicedo et al, *Biofiltración: Tecnología Aplicada a Contaminantes Líquidos y Gaseosos*, [recurso electrónico] /org. GIMSA; comp., - Santa Marta: GIMSA, 2011.
3. A. Álvarez Mancilla, J. Jiménez - Benítez, & Y. Camargo - Caicedo. "Biofiltración para la remoción de sulfuro de hidrógeno en la estación de bombeo norte de aguas residuales", *INGE CUC*, vol. 7, nº. 1, pp. 113-126., 2011.
4. I. Isik-Gulsac, "Investigation of impregnated activated carbon properties used in hydrogen sulfide fine removal," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 4, pp. 1021–1030, 2016.
5. A. Linares-Solano, M. Á. Lillo-Ródenas, J. P. Marco-Lozar, M. Kunowsky, and A. J. Romero-Anaya, "NaOH and KOH for preparing activated carbons used in energy and environmental applications," *Int. J. Energy, Environ. Econ.*, vol. 20, no. 4, pp. 355–387, 2012.

6. H. S. Choo, L. C. Lau, A. R. Mohamed, and K. T. Lee, "Hydrogen sulfide adsorption by alkaline impregnated coconut shell activated carbon," *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 741–753, 2013.
7. Ho. Natalie, Modeling Hydrogen Sulfide Adsorption by Activated. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. University of Toronto. (Tesis)., 2012.
8. A. Gómez, W. Klose, S. L. Rincón, and W. Wiest, "Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO," *Rev. Palmas*, vol. 25, pp. 461–471, 2004.
9. J. Romero - González, J.L. García - Alcaraz, G. Velázquez- Angulo, A. Aracely Maldonado - Macías, I. Canales - Valdivieso, J. Romero - Rodríguez. Modelación del proceso de transferencia de masa en columnas de lecho fijo de la bioadsorción del cr(vi) usando transformadas de Laplace. Instituto de Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. CULCYT//Septiembre-Diciembre 2010. Año 7, No. 40-41.
10. H. Zhang and D. Cheng, "Mathematical model for a fixed bed adsorptive reactor," *Carbon N. Y.*, vol. 38, no. 6, pp. 877–880, 2000.
11. Z. Xu, J. Cai, and B. Pan, "Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 14, no. 3, pp. 155–176, 2013.
12. M. T. Namini, N. Abdehagh, S. M. Heydarian, B. Bonakdarpour, and D. Z. B. Kooki, "Hydrogen sulfide removal performance of a bio-trickling filter employing *Thiobacillus thiparus* immobilized on polyurethane foam under various starvation regimes," *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 1278–1283, 2012.
13. M. Cáceres, M. Morales, R. San Martín, H. Urrutia, and G. Aroca, "Oxidation of volatile reduced sulphur compounds in biotrickling filter inoculated with *Thiobacillus thioiparus*," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 13, no. 5, 2010.
14. C. Pizarro, A. Donoso-Bravo, D. Jeison, G. Ruiz-Filippi, and R. Chamy, "Biofilm formation for organic matter and sulphate removal in gas-lift reactors," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 14, no. 4, p. 3, 2011.
15. M. S. Horikawa, F. Rossi, M. L. Gimenes, C. M. M. Costa, and M. G. C. Silva, "Chemical absorption of h₂s for biogas purification," *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 21, no. 03, pp. 415–422, 2004.
16. L. M. Frare, M. L. Gimenes, and N. C. Pereira, "Correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás," *Acta Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, 2009.
17. S. Dahle, "Efficient new process for the desulfurization of mixtures of air and hydrogen sulfide via a dielectric barrier discharge plasma Efficient new process for

the desulfurization of mixtures of air and hydrogen sulfide via a dielectric barrier discharge plasma,” vol. 107234, no. 2015, 2017.

18. J. Silva, M. Morales, M. Cáceres, P. Morales, and G. Aroca, “Modelling of the biofiltration of reduced sulphur compounds through biotrickling filters connected in series: Effect of H₂S,” *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 15, no. 3, 2012.

19. D. Kantachote, W. Charernjiratrakul, N. Noparatnaraporn, and K. Oda, “Selection of sulfur oxidizing bacterium for sulfide removal in sulfate rich wastewater to enhance biogas production,” *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 11, no. 2, 2008.

20. V. Torretta, M. Schiavon, E. A. Papa, P. Caruson, and A. G. Capodaglio, “Removal of odorous sulphur compounds from industrial gases by biotrickling filters,” *Ambient. e Agua - An Interdiscip. J. Appl. Sci.*, 2016.

21. S. Polruang, P. Banjerdkij, and S. Sirivittayapakorn, “Use of drinking water sludge as adsorbent for H₂S gas removal from biogas,” *Environment Asia*, 2017.