

Proceso de adsorción como propuesta de remediación para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Adsorption process as a remediation proposal for the groundwater treatment contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

Francisco Ferreira^{*1,2}, Enrique Fabián Núñez Paredes², Alfredo Acosta^{1,2}, Liz Karen Valdez Sosa², Williams Martins Ferreira Merlos², ¹Universidad Nacional de Asunción. Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas. San Lorenzo, Paraguay. ²Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. San Lorenzo, Paraguay. *Autor de correspondencia: licfranferre10@gmail.com.

Recibido: setiembre 2020

Aceptado: octubre 2020

Recibido en versión modificada: noviembre 2020

Ferreira, F., Núñez Paredes, E. F., Acosta, A., Valdez Sosa, L. K. y Ferreira Merlos, W. M. (2020). Proceso de adsorción como propuesta de remediación para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. *Revista Investigaciones y Estudios – UNA*, 11(2), 02-11. <https://doi.org/10.47133/IEUNA2021>.

Resumen. Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (denominados HAPs) son un grupo de compuestos derivados de actividades antropogénicas principalmente de aquellas que involucren la combustión incompleta de derivados del petróleo, gas y cualquier materia orgánica, que podrían causar daños a la salud de los seres vivos. Este trabajo se estableció una opción económica y efectiva para la remediación de aguas subterráneas contaminadas con HAPs. La determinación de HAPs por Cromatografía Líquida de Alta

Resolución acoplada a un Detector de Arreglo de Diodos (HPLC/DAD) fueron determinados en distintos países con adsorbentes estándares y bajo diferentes condiciones de ensayo como en Argentina, Brasil, Colombia y Venezuela, utilizando una variedad de materiales adsorbentes estándares y bajo diferentes condiciones de ensayo. Como objetivo se planteó una alternativa de remediación de contaminación por HAPs, encontrándose una efectividad elevada, considerando el tiempo de reacción y el porcentaje de remoción de las moléculas estudiadas (Naftaleno, Antraceno y Fenantreno) empleando técnicas de Físicoquímica de Superficie (Adsorción). Los resultados mostraron una elevada efectividad a corto plazo entre un 50-90 % (aproximadamente de remoción), por lo que sugiere una alternativa a dicho problema.

Palabras clave. HAPs, adsorción, remediación, contaminación.

Abstract. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (known as PAHs) are a group of compounds derived from anthropogenic activities, mainly those involving the incomplete combustion of oil derivatives, gas and any organic matter, which could cause damage to the health of living beings. This work established an economical and effective option for the remediation of groundwater contaminated with PAHs. The determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by means of High Resolution Liquid Chromatography to a Diode Array Detector (HPLC / DAD) was determined with standard adsorbents and under different test conditions in different countries such as in Argentina, Brazil, Colombia and Venezuela using a variety of standard adsorbent materials and under different assay conditions. Within this context as an objective, a possible remediation of contamination by PAHs was raised, finding a high effectiveness, considering the reaction time and the percentage of removal of the molecules studied (Naphthalene, Anthracene and Phenanthrene) using Surface Physicochemical techniques (Adsorption). The results showed high effectiveness in the short term between 50-90 % removal approximately suggesting an economic alternative to this problem.

Keywords. PAHs, adsorption, remediation, pollution.

INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son sustancias de naturaleza aromática, con dos o más anillos fusionados (Lafleurz et al., 1996) que tienen su origen en la combustión incompleta o pirolisis de la materia orgánica, por la actividad natural o antropogénica (industrias para el procesamiento de maderas, metales varios, pesticidas) y por diagénesis o biosíntesis se producen cantidades muy pequeñas. Factores tales como tipo y cantidad de combustible, temperatura, duración de la combustión y disponibilidad de oxígeno determinan la naturaleza y grado de formación de HAPs (Peña Sendón, 2010).

Las características físicoquímicas de los HAPs son muy diversas; algunos de ellos son semi-volátiles, es decir, que están en forma gaseosa a temperatura ambiente, mientras que otros tienen un elevado punto de ebullición. En general inestables fotoquímicamente y lipofílicos, es decir, tienden a unirse a sustancias grasas, y a disolverse en ellas. Este carácter lipofílico de los HAPs se incrementa con la complejidad de los compuestos y la masa molecular, cuantos más átomos y más anillos forman la molécula del HAP mayor es su afinidad por las grasas (Agudo, 2010).

Algunas de las moléculas que se encuentran dentro de los HAPs tienen interés principalmente industrial. El antraceno se usa en la producción de antraquinona, una importante materia prima para la fabricación de colorantes rápidos. Se emplea también como diluyente para conservantes de madera y en la

producción de fibras sintéticas, plásticos y monocristales. El fenantreno se utiliza en la fabricación de colorantes y explosivos, en la investigación clínica y la síntesis de fármacos.

El benzofurano se emplea en la fabricación de resinas de cumarona-indeno. El fluoranteno es un componente que se usa como material de revestimiento para proteger el interior de las tuberías de agua potable de acero y hierro dúctil y los tanques de almacenamiento (Peña Sendón, 2010).

Se han considerado los siguientes 18 HAPs como las principales moléculas que causan efecto sobre la salud humana y animal, pero sólo tres poseen relevancia (naftaleno, antraceno y fenantreno), dado que son materias primas para la síntesis de otros compuestos. (Samudío Pérez, 2017). La exposición a los HAPs está asociada con diferentes afecciones en la salud humana, que incluyen toxicidad cardiovascular, efectos negativos sobre la reproducción y la médula ósea, supresión del sistema inmune o toxicidad en el hígado; no obstante, el efecto tóxico más importante como resultado de la exposición a los HAP es el cáncer por lo que explica el interés sobre la presencia de estas sustancias en matrices ambientales. Trazas de HAPs han sido halladas en muchos alimentos (vegetales, aceites vegetales, frutas, cereales, alimentos marinos, carne a la brasa, pescado ahumado, café y té) (Vives et al., 2001).

Dentro de los ambientes acuáticos los HAPs sufren una serie de procesos de intemperización (El-Shahawi et al., 2010) tales como evaporación, oxidación fotoquímica,

degradación microbiana, dispersión y disolución en el agua, de esta forma se asocian fácilmente con la materia particulada y finalmente se depositan en el sedimento (Witt et al., 2010).

Varias son las técnicas experimentales con el fin de remediar contaminación ambiental causadas por moléculas con origen en las actividades humanas. Una de ellas es la bioremediación, la cual emplea organismos vivos como vehículo de remoción de contaminantes. Otras técnicas emplean Procesos Avanzados de Oxidación (PAO), pero con desventajas en generar productos de oxidación a veces más tóxicos que las moléculas de partida (Cuesta Berrio, 2019).

Existen varios modelos de Adsorción, la cual depende de la naturaleza fisicoquímica del adsorbente, en lo que se menciona los de Langmuir en la adsorción de pesticidas en agua (Leyva Ramos, 2007), Freundlich adsorción de compuestos fenólicos en solución (Lazo et al., 2008) y Brenauet – Emmet – Teller en la adsorción de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) (García-Asenjo, 2014). Una aplicación de la Adsorción es la extracción en fase sólida – líquida en sus diversas modalidades se ha convertido en una alternativa de elección para la remediación del agua contaminada con HAPs en matrices acuosas (Santana-Romero et al., 2012) utilizando como adsorbente sólidos granulares, polvos como el carbón activado, silicagel y tierra de diatomeas.

El presente trabajo tuvo por objetivo proponer una alternativa de remediación de aguas subterráneas contaminadas con HAPs

(Antraceno, Fenantreno y Naftaleno) que pueden ser causadas por actividades industriales (estaciones de servicio) o domésticas, mediante un estudio de la cinética de adsorción y su cuantificación por HPLC/DAD.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de adsorción se realizó en el laboratorio de instrumental de FACEN-UNA.

Para esto, se estableció dar seguimiento del mencionado proceso utilizando la técnica de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC) con detector de Arreglo de Diodos (DAD) y software de adquisición de datos LCSolución (Shimadzu). Para fijar los parámetros de longitud de onda de máxima absorción por el detector DAD se preparó una solución de 10 ppm de los estándares de cada una de las moléculas HAPs, para Naftaleno se utilizó un estándar de la marca Sigma®, para el Antraceno se utilizó un estándar de la marca Merck, y para el Fenantreno un estándar de la marca Biopac, empleando Etanol p.a. de la marca Merck como disolvente y realizando un barrido espectral en un margen entre 200 nm–400 nm.

Para establecer las condiciones cromatográficas del método de análisis empleado, se realizó la preparación de un Estándar de 10 ppm de mezcla de las moléculas estudiadas y soluciones individuales de cada molécula. Se observó su comportamiento cromatográfico, considerando tiempos de retención y áreas bajo la curva y factor de cola (Tailing), todos los análisis emplearon una columna de la marca Zorbax Eclipse XDB-C18

(Octadecilsilano) de 150 mm de longitud, 4,6 mm de diámetro interno y 4 μm de tamaño de partícula, empleando como fase móvil diferentes proporciones de Agua/Metanol/ACN como 50:20:30, 50:30:20 y 20:50:30. El adsorbente empleado fueron bloques cerámicos (ladrillos) adquiridos de un comercio de la localidad de Tobatí-Departamento de Cordillera fabricados en el mismo día.

Previamente al ensayo, el Adsorbente cerámico (polvo de ladrillo) fue sometido a un tratamiento preliminar previo que consistió en su pulverización con mortero y su posterior tamización con tamiz 0,250 mm (Figura 1).



Figura 1. Proceso de tamización de los bloques cerámicos utilizados como adsorbente cerámico. Izquierda, tamizado manual con tamiz 0,250 mm. Imagen a la derecha, producto final de tamizado.

Se realizó un lavado con agua destilada y Etanol p.a. hasta que su conductividad (Figura 2) permanezca constante a fin de eliminar otros interferentes como sales de hierro y materia orgánica remanente. Al final del proceso se secó en estufa a 105 °C por 24 horas antes de su uso.

Para el ensayo enmarcado, se pesó 500 mg del Adsorbente en seis tubos de ensayo con tapa, se agregaron 10 mL de solución de HAPs



Figura 2. Lavado del Adsorbente con agua destilada y Etanol p.a. para estabilizar conductividad. Cuantificación de la conductividad con (Thermo Fischer Orion Star A111).

(Estándar Mix) que contenían 10 ppm de cada molécula (Antraceno, Fenantreno, Naftaleno) disueltos en una mezcla de Etanol-Agua (1+9) en los diferentes tubos de ensayos, luego se agitaron y se dejaron en reposo durante 10, 20, 30, 1.440, 2.880 y 4.320 minutos.

Se retiró 5 mL del sobrenadante de cada tubo (a cada uno de los tiempos referidos), se realizó extracción líquida/líquida con 5 mL de Diclorometano, se llevó a rotavapor hasta sequedad a 40 °C y se reconstituyó con 5 mL de ACN; se filtró e inyectó en HPLC/DAD utilizando un blanco, estándar Mix sin adsorbente y las moléculas en forma separada a fin de determinar orden de elución y por consiguiente la identidad de los mismos.

Los datos obtenidos fueron registrados en una planilla Excel 2016, y en el cual se consignó la molécula ensayada, la concentración generada (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) a partir del Cromatografía Líquida de Alta Resolución y su comportamiento fue graficado en la misma planilla, donde en ordenadas se encuentra el tiempo de ensayo (minutos) y en abscisas la señal generada en cada punto.

RESULTADOS

Barrido Espectral. A continuación, se muestran los espectros de las soluciones de cada una de las moléculas estudiadas con el fin de establecer parámetros del detector DAD del HPLC (Figura 3).

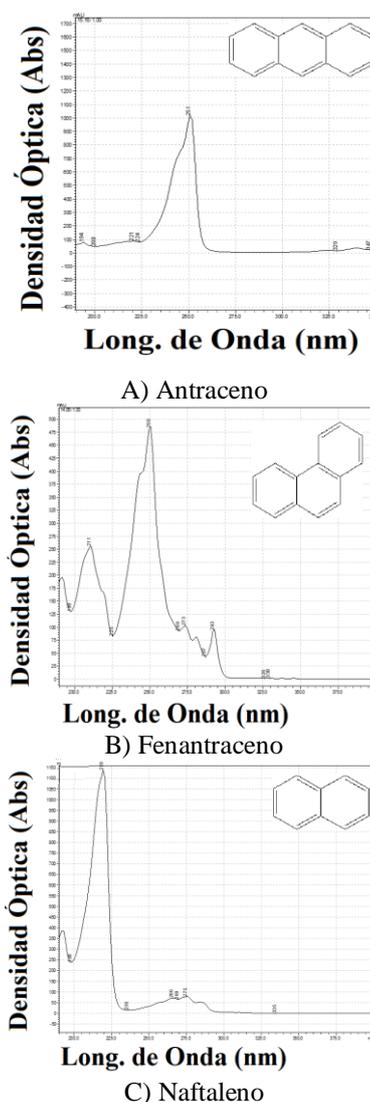


Figura 3. Espectro UV de los HAPs analizados. A) Antraceno (λ_{max} 250 nm), B) Fenantreno (λ_{max} 250 nm), el antraceno y el fenantreno tienen la misma longitud de onda de máxima absorción (λ_{max} 250 nm) y similar banda espectral (tres anillos fusionados) y C) Naftaleno (λ_{max} 220 nm), grado de condensación es diferente (dos anillos fusionados).

Condiciones Cromatográficas. De acuerdo con lo propuesto, realizando diversas pruebas y tomando como parámetro de identificación Cromatográfica al tiempo de retención del Antraceno (Figura 4), del Fenantreno (Figura 5) y del Naftaleno (Figura 6) por separado y una mezcla de ellos (Figura 7 y 8), se tuvieron los siguientes resultados, consignados en la Tabla 1.

En la Figura 4, mostró el Cromatograma del Antraceno en Solución, demostrando un comportamiento gaussiano (campana) con un tiempo de retención de 7,81 minutos a una concentración de 10 mg.L⁻¹ a una longitud de onda de 250 nm. De la misma manera se obtuvieron los Cromatogramas de Fenantreno (Figura 5) con la misma longitud de onda que el Antraceno, pero con un tiempo de retención diferente de 7,47 minutos.

Tabla 1. Condiciones Cromatográficas utilizadas para el análisis por HPLC-DAD de las moléculas Antraceno, Fenantreno y Naftaleno.

Condición Cromatográfica	Resultado
Fase Móvil	Acetonitrilo: Agua: Metanol (50:30:20)
Columna	C18 (150 mm x 4 mm x 4,6 μm)
Tiempo de corrida	10 min
Temperatura	40 °C
Flujo	0,800 mL.min ⁻¹
Temperatura del Horno	40 °C
Volumen de Inyección	10 μL

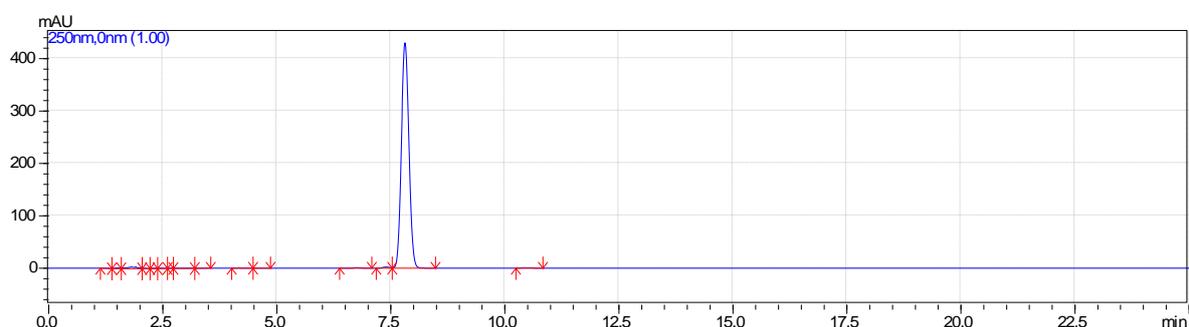


Figura 4. Cromatograma de una solución de Antraceno (λ_{\max} 250 nm) bajo las condiciones cromatográficas. Eje de abscisas: Intensidad de la Señal generada por el Detector DAD (mAU), Eje de ordenadas: Tiempo de análisis (min: minutos)

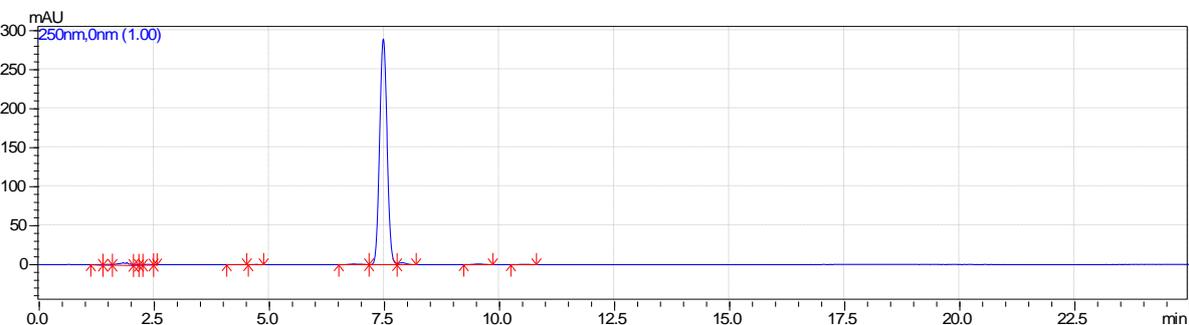


Figura 5. Cromatograma de una solución de Fenantreno bajo las condiciones cromatográficas. Eje de abscisas: Intensidad de la Señal generada por el Detector DAD (mAU), Eje de ordenadas: Tiempo de análisis (min: minutos).

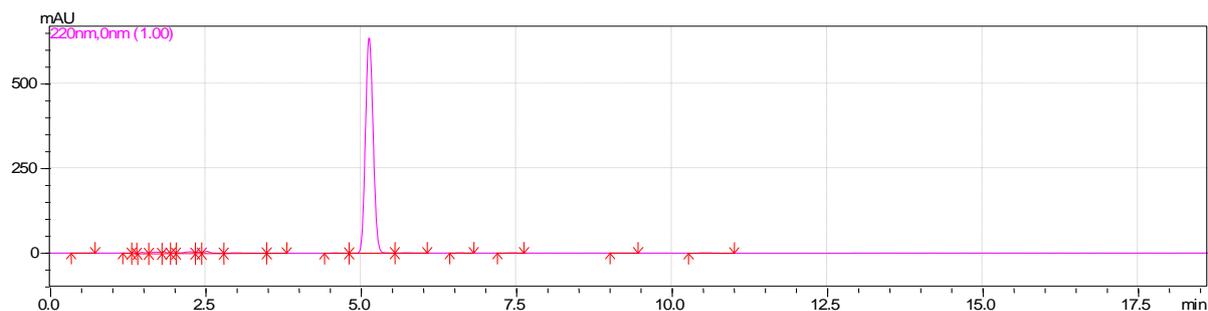
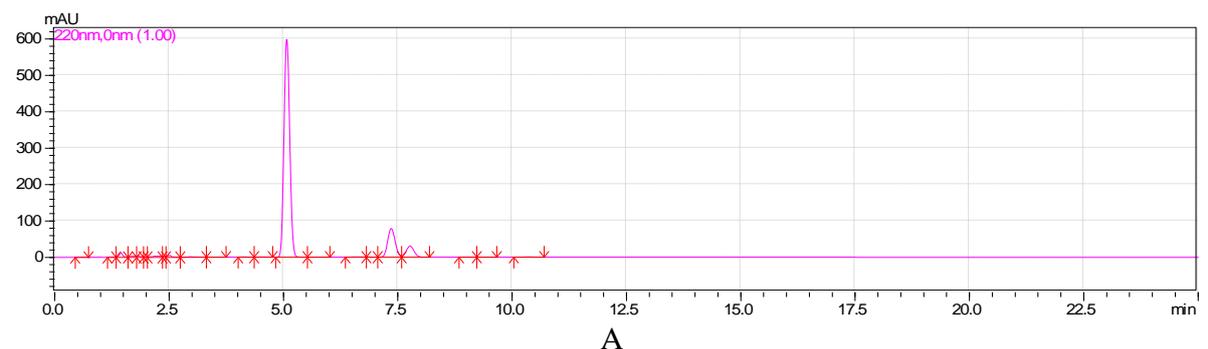
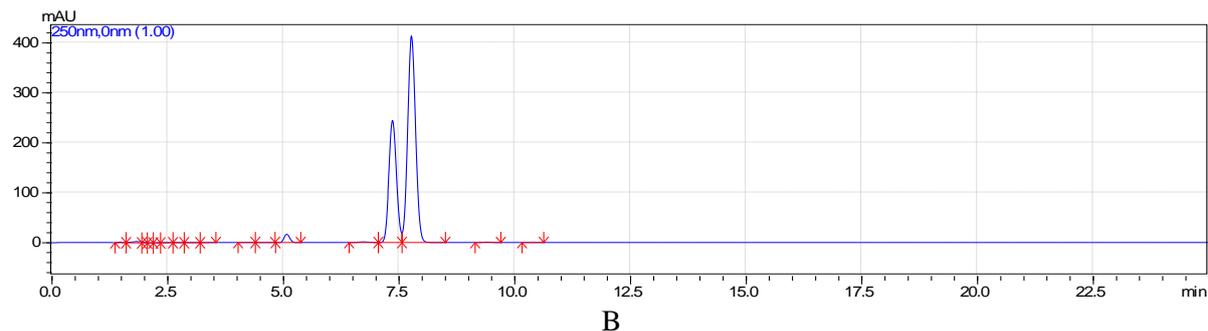


Figura 6. Cromatograma de una solución de Naftaleno bajo las condiciones cromatográficas. Eje de abscisas: Intensidad de la Señal generada por el Detector DAD (mAU), Eje de ordenadas: Tiempo de análisis (min: minutos).



A



B

Figura 7. Cromatograma de una solución mezcla de Fenantreno, Antraceno y Naftaleno bajo las condiciones cromatográficas. A) Longitud de onda máxima a 220 nm; B) Longitud de onda máxima a 250 nm. Eje de abscisas: Intensidad de la Señal generada por el Detector DAD (mAU), Eje de ordenadas: Tiempo de análisis (min: minutos).

En tanto, el Naftaleno en solución (Figura 6), presenta una longitud de onda (220 nm) diferente de las demás moléculas estudiadas, además de presentar un tiempo de retención de 5,12 minutos también diferente, por lo que facilitó la identificación por orden de elución, además de la longitud de onda.

En la Figura 7A se demostró la baja influencia del Naftaleno a 220 nm observándose picos cromatográficos apenas perceptibles de las moléculas Fenantreno, Antraceno. De la

misma manera, cambiando a la longitud de onda de 250 nm (Figura 7B) se apreció los picos de Fenantreno, Antraceno y la casi nula presencia del Naftaleno, estando el mismo presente. Éste hecho posibilitó la identificación de las moléculas estudiadas, tomando como parámetro de identificación la longitud de onda y el tiempo de retención. Las diferencias se mostraron debido principalmente al grado de condensación que posee (2 y 3 anillos respectivamente), además de su isomería

estructural (Fenantreno y antraceno).

Cinética de Adsorción. Una vez que fueron establecidos las condiciones cromatográficas, se procedió al ensayo de cinética de adsorción, considerando el descenso en la concentración (mg.L^{-1}) (Tabla 2) de una solución Estándar Mix en ausencia del adsorbente como punto de partida ($T=0$ minutos) y calculando el porcentaje remanente de cada molécula con el transcurso del tiempo (Tabla 3) en contacto con el adsorbente ensayado (polvo de cerámica).

En la cinética se mostró que, al aumentar el tiempo de exposición del Antraceno y Fenantreno, la concentración retenida en el adsorbente ensayado, fluctúa con tendencia a disminuir en ambos casos (Tabla 2), además

Tabla 2. Cinética de Adsorción HAPs (Antraceno, Naftaleno y Fenantreno).

Tiempo (minutos)	Antraceno Retenido (mg.L^{-1})	Naftaleno Retenido (mg.L^{-1})	Fenantreno Retenido (mg.L^{-1})
0	10	10	10
10	9,868	-	7,721
20	9,070	-	9,095
30	9,109	-	9,078
1440	9,030	-	9,040
2880	8,832	-	8,827
4332	8,798	-	8,771

mostró un bajo porcentaje remanente en solución sobrenadante (Tabla 3), debido a que la mayor parte del soluto (Fenantreno y Antraceno) se encuentra retenido en el seno adsorbente (polvo cerámico).

En cuanto al Naftaleno no se pudo cuantificar el porcentaje de remanente en la sobrenadante (Tabla 3) por la ausencia de señal a la longitud de onda y tiempo de retención empleado para su identificación, bajo las

condiciones cromatográficas empleadas, por lo que hace suponer que hubo una adsorción completa de dicha molécula.

Tabla 3. Porcentaje Remanente de HAPs (Antraceno, Naftaleno y Fenantreno).

Tiempo (minutos)	Antraceno Remanente (%)	Naftaleno Remanente (%)	Fenantreno Remanente (%)
0	100	100	100
10	1,323	-	22,79
20	9,298	-	9,046
30	8,914	-	9,222
1440	9,070	-	9,598
2880	11,68	-	11,73
4332	12,02	-	12,29

Graficando los datos obtenidos de Concentración de moléculas HAPs retenidas (Fenantreno, Antraceno y Naftaleno) (Tabla 2) (mg.L^{-1}) vs tiempo (minutos), se obtuvo el siguiente comportamiento (Figura 8).

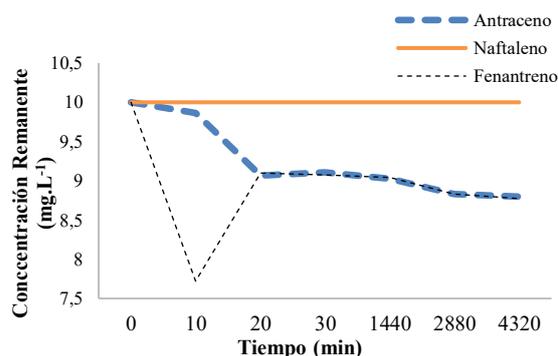


Figura 8. Cinética de Adsorción de los HAPs a la misma concentración inicial.

DISCUSIÓN

Los tiempos de retención y las diferentes longitudes de onda permiten una buena identificación de las moléculas estudiadas.

Con ninguno de los HAPs pudo realizarse una comparación con principios de fisicoquímica de superficie convencional (comportamiento linearizable) como los establecidos por Lagmuir, Freunlich y Brenauet

– Emmet y Teller, debido a la alta eficiencia del ensayo en el tiempo anteriormente mencionado (Peña et al., 2003), mejorando el resultado expuesto por Samudio Pérez (2017).

De acuerdo con los resultados obtenidos no se encontró señal alguna de la molécula naftaleno a los 10 minutos de reacción, por lo que se supone una adsorción del 100 %, lo cual indicó una efectividad superior a lo esperado, muy superior a lo reportado por Peña et al. (2003) de la misma molécula, pero en silicagel.

En el caso del Fenantreno, se demostró una efectividad del 47 % a los 10 minutos, aumentando el porcentaje de retención a los 20 minutos, llegando a un máximo y manteniéndose casi constante al término de la reacción (90 % aproximadamente) (Figura 8), mayor que lo reportado por Cabal Álvarez (2009), pero en carbón activado.

Por último, el Antraceno, se demostró una efectividad del 98 % a los 10 minutos, manteniéndose casi constante durante toda la reacción (90 % aproximadamente) (Figura 8), mayor a lo reportado por Samudio Pérez (2017). Las fluctuaciones del ensayo fueron debidas a errores durante el proceso de extracción y cambio de solvente.

En el contexto de este trabajo se mostró que el polvo de cerámico (ladrillo) es un buen adsorbente debido al corto tiempo (10 minutos) de exposición que posee una muestra de agua enriquecida con los HAPs con una elevada efectividad de adsorción (entre 50 % y 90 % de rendimiento, incluso 100 % en el caso del naftaleno).

En el presente trabajo, se evaluó la

efectividad de remoción de HAPs (Antraceno, Fenantreno y Naftaleno) en agua como posible alternativa de remediación de aguas subterráneas contaminadas con HAPs a causa de actividades industriales (estaciones de servicio) o domésticas, mediante un estudio de la cinética de adsorción. En el mismo, se ha verificado una elevada efectividad del polvo cerámico (ladrillo) como con valores donde se reduce considerablemente el contenido de los mismos durante el tiempo de exposición propuesto.

Considerando que el medio adsorbente es de fácil accesibilidad además de reducido costo (el costo de 1 unidad, de aproximadamente 1 Kilogramo (Kg) de ladrillo, oscila entre los 0,12-0,14 Dólares americanos (USD) en relación con otros adsorbentes clásicos como Alumina (USD 150 por Kilogramo), Silicagel (USD 100 por Kilogramo) o Carbón Activo empleado para el tratamiento de aguas para su consumo (USD 2 por kilogramo).

A partir de la estandarización para una propuesta de remediación por Adsorción, se pueden realizar determinaciones sobre muestras de aguas contaminadas y someterlas a ensayo, considerando los resultados obtenidos en este trabajo.

Declaración de interés. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudo, A. (2010). *Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP). Acercamiento a su Problemática como riesgo laboral*. Process Print. 130. p.
- Cabal Álvarez, M. B. (2009). *Depuración de efluentes contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos mediante carbones activados: Evaluación del proceso de adsorción* [Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo]. DIGITAL.CSIC.
- Cuesta Berrio, H. (2019). *Procesos avanzados de oxidación aplicados al tratamiento de las aguas residuales de la industria petroquímica: Fenton y foto-fenton*. [Tesis de Grado. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. 49 p.
- El-Shahawi, M. S., Hamza, A., Bashammakh, A. S. & Al-Saggaf, W. T. (2010). An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants. *Talanta*, 80 (5), 1587–1597.
- García-Asenjo, N. (2014). *Una nueva generación de Carbones Activados de Altas Prestaciones para Aplicaciones Medioambientales*. [Tesis Doctoral. Instituto Nacional del Carbón. Universidad de Oviedo. Oviedo]. DIGITAL.CSIC.
- Lafleurz, L., Taghizadeh, K., Howard, J. B. & Anacleto, J. F. (1996). Characterization of Flame-Generated C10 to C160 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Atmospheric-Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometry with Liquid Introduction via Heated Nebulizer Interface. *Journal of American Society form Mass Spectrometry* 7. 276-286.
- Lazo, J. C., Navarro, A. E., Sun-Kou, M. R. y Llanos., B. P. (2008). Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. *Revista Sociedad Química Perú*, 74 (1). 3-19.
- Leyva Ramos, R. (2007). Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida en sólidos porosos. En: Moreno-Piriján, J. C. *Preparación, caracterización y aplicaciones*. (pp 155-207). Ediciones Uniandes.
- Peña Sendón, M. T. (2010). *Desarrollo de nuevas metodologías de preparación de muestra para la determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en matrices medioambientales y alimentarias*. [Tesis Doctoral en Química]. Universidad de Santiago de Compostela, Facultad de Química, Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología]. 1–392.
- Peña, A., Morales, J. y Labastida, C. (2003). Extracción en fase sólida como una alternativa para el procedimiento de limpieza en la determinación de hidrocarburos aromáticos por cromatografía de gases. Aplicación a Organismos Marinos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19 (1), 13-23.
- Samudio Pérez, M. C. (2017). Evaluación de procesos fisicoquímicos de adsorción de Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAPs). *Reportes Científicos de la FACEN*, 8 (1), 12–25.
- Santana-Romero, J. L., Valdés-Callado, M., Olivares-Rieumont, S. y Lima-Carzola, L. (2012). Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros en aguas superficiales de los ríos Almendares y Luyanó en La Habana. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 43, 1–7.
- Vives, Í., Grimalt, J. O. y Guitart, R. (2001). Los hidrocarburos aromáticos policíclicos y la salud humana. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*, 3, 45–47.
- Witt, G., Bartsch, C., Liehr, G. A., Thiele, R. y McLachlan, M. S. (2010). Using solid-phase microextraction to evaluate the role of different carbon matrices in the distribution of PAHs in sediment-porewater systems of the Baltic Sea. *Journal Soils Sediments* 10, 1388–1400.