

Artículo de Investigación

Remoción de cadmio en muestras de agua del estero El Macho, Machala-Ecuador, utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata

Removal of cadmium in water samples from the El Macho estuary, Machala-Ecuador, using polyurethane foam activated with silver nanoparticles as an adsorbent

Hugo Romero Bonilla¹, Mayra Escudero¹, Luiggi Solano¹

¹Grupo de Investigación Aplicaciones Electroanalíticas y Bioingeniería, Universidad Técnica de Machala, Ecuador, 070222; mayra.escudero@epoch.edu.ec; losolano@utmachala.edu.ec

*Correspondencia: hromero@utmachala.edu.ec

Citación: Romero, H.; Escudero, M. & Solano, L., (2024). Remoción de cadmio en muestras de agua del estero El Macho, Machala-Ecuador, utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata. *Novasinerugia*. 7(2). 36-51.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.14.03>

Recibido: 17 julio 2023

Aceptado: 17 enero 2024

Publicado: 03 julio 2024

Novasinerugia
ISSN: 2631-2654

Resumen: La demanda creciente del sector vivienda en la ciudad de Machala-Ecuador convirtió a las invasiones en el modelo común de crecimiento desorganizado de esta ciudad, donde utilizan el estero “El Macho” para la eliminación de desechos y aguas negras. Estudios preliminares respecto al contenido de metales pesados en este estero concluyen que las concentraciones de metales como el cadmio son superiores a los límites establecidos en la normativa del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. En la presente investigación se evaluó la remoción de cadmio de muestras de aguas del estero “El Macho” utilizando espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata como adsorbente. Para la recolección de los datos de adsorción se diseñó de un reactor tubular vertical, utilizando 1,560 g de adsorbente de poliuretano modificado con nanopartículas de plata, pH 8 y tamaño de la espuma de poliuretano de forma cubica de 0,5 cm de lado. Se cuantificó las concentraciones de cadmio mediante espectroscopia de absorción atómica, en muestras de aguas del Estero antes y después de su paso por el reactor. Se concluye que la espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata, como adsorbente, alcanzó un porcentaje de remoción de 48,75% y, por lo tanto, es efectivo para el tratamiento de aguas contaminadas con cadmio.

Palabras clave: Espuma de poliuretano, Nanopartículas de plata, Remoción de metales pesados.

Abstract: The growing demand of the housing sector in the city of Machala-Ecuador turned invasions into the common model of disorganized growth of this city, where they use the “El Macho” estuary for the disposal of waste and sewage. Preliminary studies regarding the content of heavy metals in this estuary conclude that the concentrations of metals such as cadmium are higher than the limits established in the regulations of the Unified Text of Secondary Legislation of the Ministry of the Environment. In the present investigation, the removal of cadmium from water samples of the “El Macho” estuary was evaluated using polyurethane foam activated with silver nanoparticles as an adsorbent. To collect adsorption data, a vertical tubular reactor was designed, using 1,560 g of polyurethane adsorbent modified with silver nanoparticles, pH 8 and cubic-shaped polyurethane foam size of 0.5 cm of side. Cadmium concentrations were quantified by atomic absorption spectroscopy in samples of Estero water before and after passing through the reactor. It is concluded that the polyurethane foam activated with silver nanoparticles, as an adsorbent, reached a removal percentage of 48.75% and therefore, it is effective for the treatment of water contaminated with cadmium.

Keywords: Polyurethane foam, Silver nanoparticles, Heavy metal removal.



Copyright: 2024 derechos otorgados por los autores a Novasinerugia.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo y la producción de desechos urbanos, industriales y mineros, ha provocado la presencia de cadmio en cantidades importantes en ambientes acuáticos, trayendo como consecuencia efectos negativos sobre el equilibrio de estos ecosistemas (Sáenz & Urdaneta, 2014; Amézquita, 2018; Tejada Tovar et al., 2015). Mas de 25000 toneladas de cadmio, anual, son liberadas al ambiente. Una fuente importante de emisión de cadmio es la producción de fertilizantes fosfatados artificiales (Lenntech, 2021).

El 70 % de las ciudades del Ecuador no tienen un manejo adecuado de los residuos sólidos, es por ello que, la población los arroja a los diferentes recursos hídricos, siendo conocido que los cauces de agua por debajo de los 2000 m sobre el nivel del mar están contaminados con sustancias químicas provenientes de actividades agrícolas, la mala gestión del agua en las industrias y la ausencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales dentro de las ciudades (Andrade Mera et al., 2018).

El crecimiento poblacional desorganizado de la ciudad de Machala ha causado un impacto significativo al ambiente. La generación de desechos, descargas sin previo tratamiento de aguas servidas y uso de fertilizantes y pesticidas de la producción bananera y camaronera en esta ciudad, han provocado un incremento de contaminantes, entre ellos los metales pesados (Ramírez, 2017). Particularmente, la población de Machala utiliza al estero "El Macho" para la eliminación de desechos y aguas negras (Andrade Mera et al., 2018; Zhindón et al., 2018). Estudios realizados respecto al contenido de metales pesados en este cuerpo de agua, concluyen que las concentraciones de metales, como el cadmio, son superiores a los límites establecidos en la normativa del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) (Ramírez, 2017); es por ello que, en la presente investigación se plantea la evaluación de la remoción de cadmio de muestras de aguas del estero "El Macho" utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata.

La adsorción es la forma más eficiente y económica de tratar aguas residuales, arrojando porcentajes de remoción superiores al 85 %, ya que es rentable y puede eliminar eficazmente metales de cuerpos acuosos. Además, el proceso de adsorción proporciona el diseño y la flexibilidad operativa del que a menudo se logra aguas residuales tratadas de alta calidad; donde, la adsorción puede ser reversible, si se utiliza el adsorbente adecuado (Huamaní & Huamolle, 2017; Organización Mundial de la Salud, 2021).

Existen investigaciones sobre la espuma de poliuretano, donde se reporta como adsorbente económico y eficaz para la adsorción de iones cadmio a partir de aguas contaminadas, producto de su polaridad superficial y capacidad de adsorción (Shamsi et al., 2017). La estructura química de esta espuma (Figura 1), permite su fácil uso como adsorbente en sistemas en línea de preconcentración y proporciona ventajas sobre otros adsorbentes tales como, menor presión, menor riesgo de fugas, fácil eliminación, bajo costo y buena resistencia a los cambios de pH (Shamsi et al., 2017).

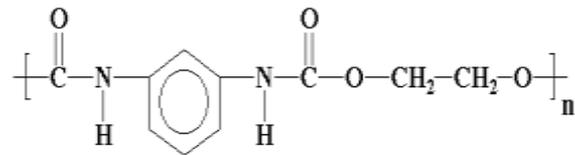


Figura 1: Estructura química de la espuma de poliuretano (González & Rivada, 2016)

2. Metodología

2.1. Ubicación de la zona de estudio

En la presente investigación se recolectaron muestras de agua del estero “El Macho” de la ciudad de Machala, basándose en la accesibilidad, el impacto de las emisiones, las fuentes cercanas de contaminación y las comunidades adyacentes expuestas, por lo que se estableció tres puntos de muestreo distribuidos a lo largo del canal al inicio, a la mitad y al final, con muestras simples, Figura 2.

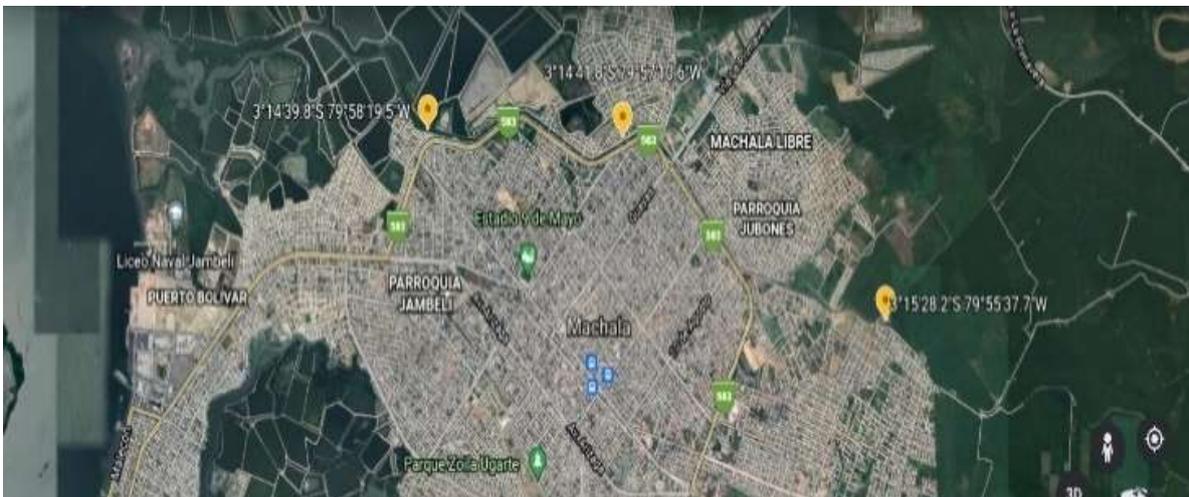


Figura 2: Puntos de muestreo. En color amarillo las ordenadas de los tres puntos de muestreo

2.2. Activación de la espuma de poliuretano con nanopartículas de plata

Para la activación de la espuma de poliuretano con nanopartículas de plata, se realizó la inmovilización de iones de este metal (AgNO_3) en la matriz polimérica y posterior formación de nanopartículas dentro de la matriz mediante la reducción de los iones metálicos, con NaBH_4 , a estado de oxidación cero. Para la preparación de los nanocompuestos, se utilizó tres tamaños de partícula de la espuma de poliuretano de forma cúbica: 0,5, 1,00 y 2,00 cm de lado. Los pasos para la activación de la espuma se resumen en la Figura 3.

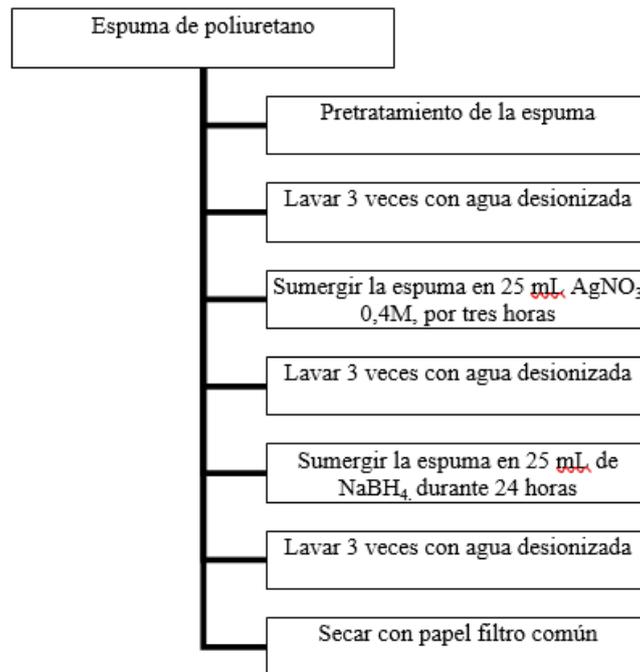


Figura 3: Activación de la espuma de poliuretano con nanopartículas de plata (Ziegler, 2013)

2.3. Evaluación de la capacidad de adsorción de la espuma de poliuretano para la remoción de cadmio

Los ensayos para la adsorción se realizaron mediante un proceso continuo con recirculación de muestras de agua tomadas en el Estero “El Macho”. Se fijaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente 27 °C, pH 8, tiempo de remoción 300 min, tamaños de partícula de la espuma de poliuretano de forma cúbica de 0,5, 1,00 y 2,00 cm de lado (Ensayos E1, E2 y E3 respectivamente), masa de adsorbente 1,5652 g y una concentración inicial de Cd (II) de 1,6 mg/L. Posteriormente, se montó un sistema conformado por un reactor tubular vertical conectado a una bomba peristáltica (Figura 4), a una velocidad de bombeo 70 rpm, se colocó 1,5652 g de espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata.



Figura 4: Montaje del reactor tubular para los ensayos de adsorción

Se añadió previamente en el reactor 400 mL de muestra de agua del Estero “El Macho” que tenía una concentración inicial de 1,6 mg/L de Cd (II). Se realizó el experimento durante un tiempo de remoción 300 min. Se tomaron muestras de 20 mL a la salida del reactor cada 60 min en cada tratamiento, para determinar la capacidad de adsorción de la espuma de poliuretano mediante el cálculo del porcentaje de remoción de Cd (II). Se determinó la concentración final de metal presente en la fase líquida mediante espectroscopia de absorción atómica en un espectrofotómetro Perkin-Elmer 300, de acuerdo con las especificaciones del laboratorio LAB-METALOR-Ecuador; con estos resultados se calculó la concentración de Cd (II) retenido por la espuma de poliuretano (capacidad de adsorción) utilizando la ecuación 1 y el porcentaje de remoción mediante la ecuación 2:

$$q_e = \left(\frac{C_i - C_f}{m} \right) * V , \text{ Ecuación 1}$$

C_i = Concentración inicial de cadmio

C_f = Concentración final de cadmio

V = Volumen de solución

m = Masa de espuma de poliuretano

$$\%R = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \% , \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

C_i Concentración inicial del Cd (II) en la fase acuosa (mg/L).

C_f Concentración final del Cd (II) en el equilibrio en la fase acuosa (mg/L).

$\%R$ Porcentaje de remoción (%)

2.4. Diseño del reactor tubular vertical

Para el reactor tubular vertical, se realizó un diseño de forma cilíndrica con flujo continuo. El agua tomada en el Estero “El Macho” con presencia de Cd (II) ingresaba por un extremo del reactor y el agua tratada era bombeada por el otro extremo. Para diseñar la estructura de soporte del reactor se utilizó acero inoxidable. Para calcular el diámetro interno del reactor se utilizó el caudal del Estero “El Macho”, según (Zhindón et al., 2018): $Q=1.22 \text{ (m}^3\text{)/s}$. Para calcular el volumen del reactor tubular vertical se utilizó una longitud de 25 m (Tabla 1). Las características del material adsorbente utilizado se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1: Parámetros para los cálculos para el diseño del reactor tubular vertical

Diámetro interno del reactor	3,60 m						
Volumen del reactor (V)	254167 L						
Tiempo de retención	1800 s						
Gasto del reactor	0,014 m ³ /s						
Velocidad del fluido	0,0014 m ³ /s						
Número de Reynolds	4264						
Presión hidrostática	343000 kPa						
Constantes de la ecuación de Antoine para el agua 270 C	<table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>5,11564</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1.688</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>230,17</td> </tr> </table>	A	5,11564	B	1.688	C	230,17
A	5,11564						
B	1.688						
C	230,17						
Presión de la mezcla	$P_v = 1,47 \text{ bar}$ $P_v = 14659,7 \text{ kPa}$						
Presión de diseño	$P_{int} = P_h + P_v$ $P_{int} = 489550 \text{ kPa}$						
Cálculo del espesor mínimo del reactor	4 mm						

Tabla 2: Características del adsorbente

Volumen disponible	254,167 m ³
Tipo de adsorbente	Espuma de poliuretano con nano partículas de plata
Tamaño de partícula de la espuma de poliuretano de forma cúbica	0,5 cm de lado
Mecanismo de reacción	Fisisorción
Adsorbente usado	994,6 Kg
Volumen de material adsorbente	203 m ³
Longitud del adsorbente	20 m
Tiempo efectivo del tratamiento	240 min

Basado en el tiempo en que el adsorbente se satura para un tiempo determinado, se tomó en cuenta el volumen de muestra sobre el tiempo de saturación de la espuma de poliuretano. En la Figura 5, se muestra el reactor tubular utilizado y en la Tabla 3 los parámetros de validación.

$$Q_{(bomba)} = \frac{V}{t_{efec\ tra}} = 0,846 \frac{m^3}{min}$$

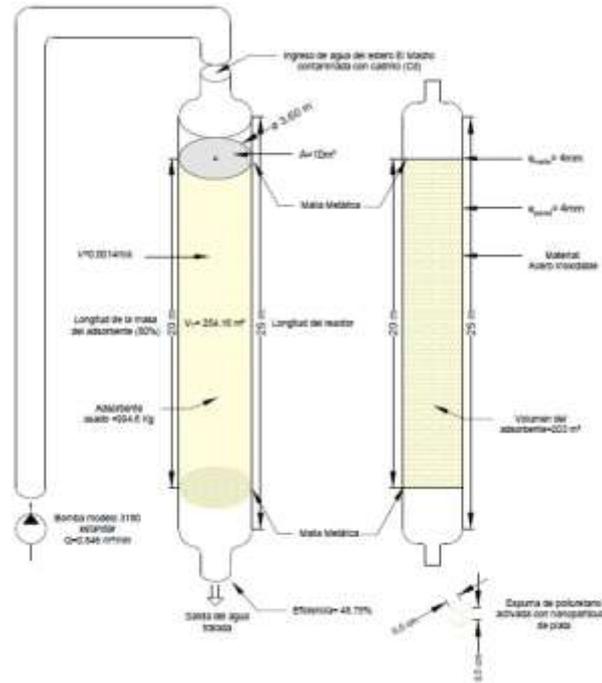


Figura 5: Reactor tubular vertical para remoción de cadmio en el estero “El Macho” en la ciudad de Machala

Tabla 3: Parámetros de validación para el reactor tubular horizontal

Parámetros de validación para el reactor tubular horizontal						
Tiempo de retención hidráulica	Longitud de la zona de absorción.	Capacidad de carga máxima	Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	Turbidez NTU	Ce $\mu\text{s/cm}$
300 min	20 m	254,167 m ³	1,90	8	11	0,1

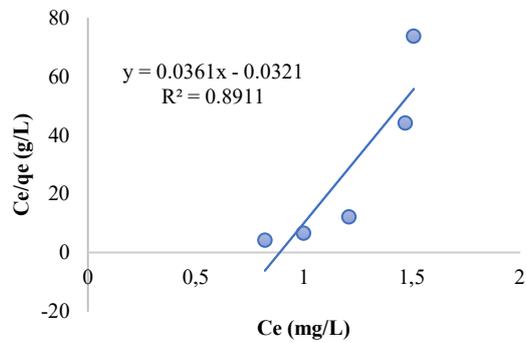
2.5. Análisis Estadístico

Para la comprobación de la hipótesis planteada en la presente investigación se aplicó la prueba de normalidad y de acuerdo con los resultados obtenidos la prueba de correlación R Pearson.

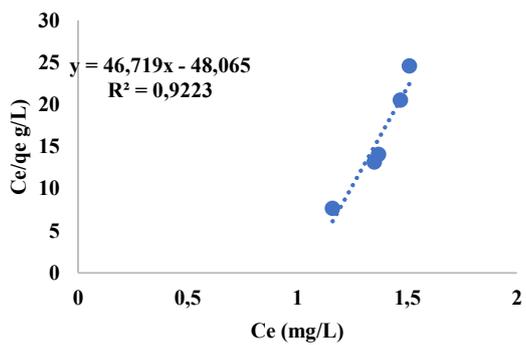
3. Resultados

3.1. Isotermas de adsorción

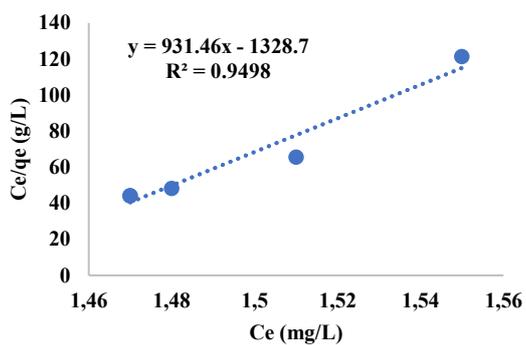
El comportamiento del proceso de adsorción, en la espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata, según el modelo de Langmuir se presenta en la Figura 6 y los resultados se resumen en la Tabla 4.



(a)



(b)



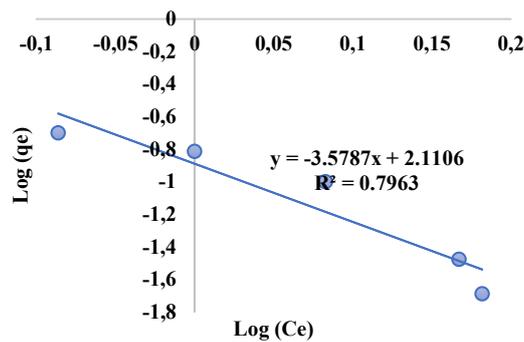
(c)

Figura 6: Isotherma de Langmuir, ensayos: a) E1, b) E2 y c) E3, obtenidas en el Reactor Tubular para la adsorción de cadmio presente en muestras de agua tomadas en el Estero "El Macho"

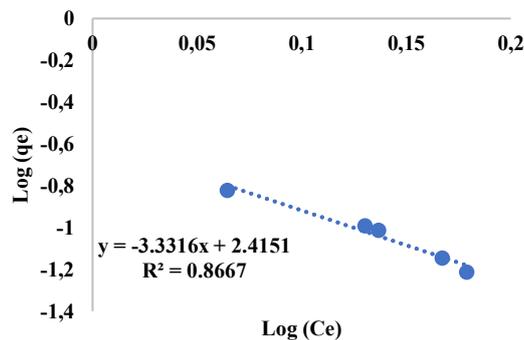
Tabla 4: Parámetros de las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich en los tres ensayos para la adsorción de Cd (II) a partir de muestras tomadas en el Estero “El Macho”

Metal	Ensayo	Langmuir			Freundlich	
		RL	qm	R2	kf	R2
Cadmio	E1	0,022	0,199	0,8911	0,4109	0,796
	E2	0,97	0,112	0,9223	0,5571	0,866
	E3	0,99	0,330	0,9498	4,464	0,884

El comportamiento del proceso de adsorción según el modelo de Freundlich se presenta en la Figura 7 y los resultados se resumen en la Tabla 4. Los resultados obtenidos de la favorabilidad de sorción (RL adimensional), concuerdan con los reportados por Shamsi et al. (2017), donde se utilizó melanina como adsorbente de cadmio y se obtuvo un valor de RL=0,98. La capacidad máxima de adsorción obtenida en esta investigación fue qm =0,199 mg/g, resultado cercano al estudio realizado por Shamsi et al. (2017), quienes reportaron qm=0,98 mg/g.



(a)



(b)

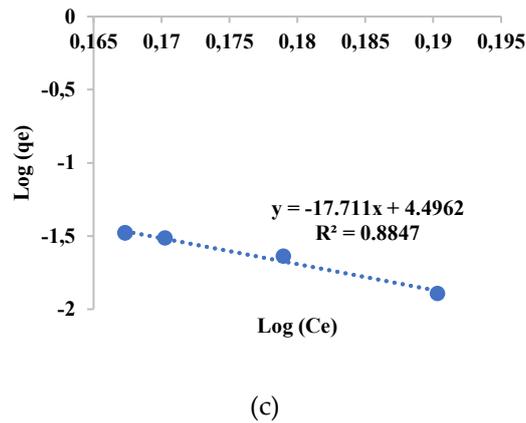
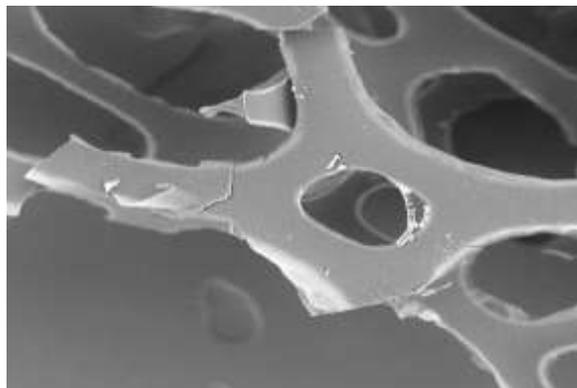


Figura 7: Isoterma de Freundlich obtenidas en el Reactor Tubular para la adsorción de cadmio presente en muestras de agua tomadas en el Estero "El Macho". Ensayos: a) E1, b) E2 y c) E3

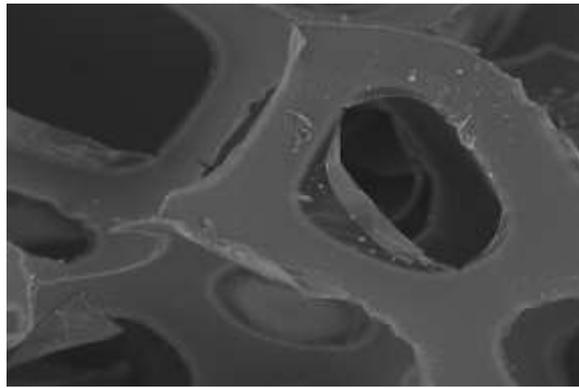
Estos resultados revelan la alta afinidad que presenta la espuma de poliuretano modificada por el cadmio. La fase sólida de la espuma de poliuretano está constituida de pequeñas burbujas que ocupan un volumen del al menos el 76 % de sus cavidades esféricas, formando geoméricamente poliedros, que le proporcionan a este material alta área superficial. En ese sentido, se considera que las nanopartículas de plata utilizadas para la modificación de la espuma aumentan aún más el área de superficie, lo que dota al material de una mayor capacidad de adsorción del metal.

3.2. Microscopia electrónica de barrido de la espuma de poliuretano

Las micrografías mostradas en la Figura 8, revelaron la presencia de nanopartículas de plata en la matriz polimérica (Figura 8b).



(a)



(b)

Figura 8: Micrografía de la espuma de poliuretano antes (a) y después (b) del proceso de adsorción de Cd obtenidas en el Reactor Tubular para la adsorción de cadmio presente en muestras de agua tomadas en el Estero "El Macho"

3.3. *Relación entre la concentración de cadmio en los ensayos de adsorción y el tamaño de la partícula de la espuma de poliuretano*

En la Figura 9, se observa que en los tres ensayos realizados la concentración final de Cd (II) en la fase líquida disminuye a medida que el tiempo de remoción incrementa, dando como resultado, después de 300 min, una concentración final de 0,82 mg/L para el ensayo 1, 1,16 mg/L para el ensayo 2 y 1,47 mg/L para el ensayo 3.

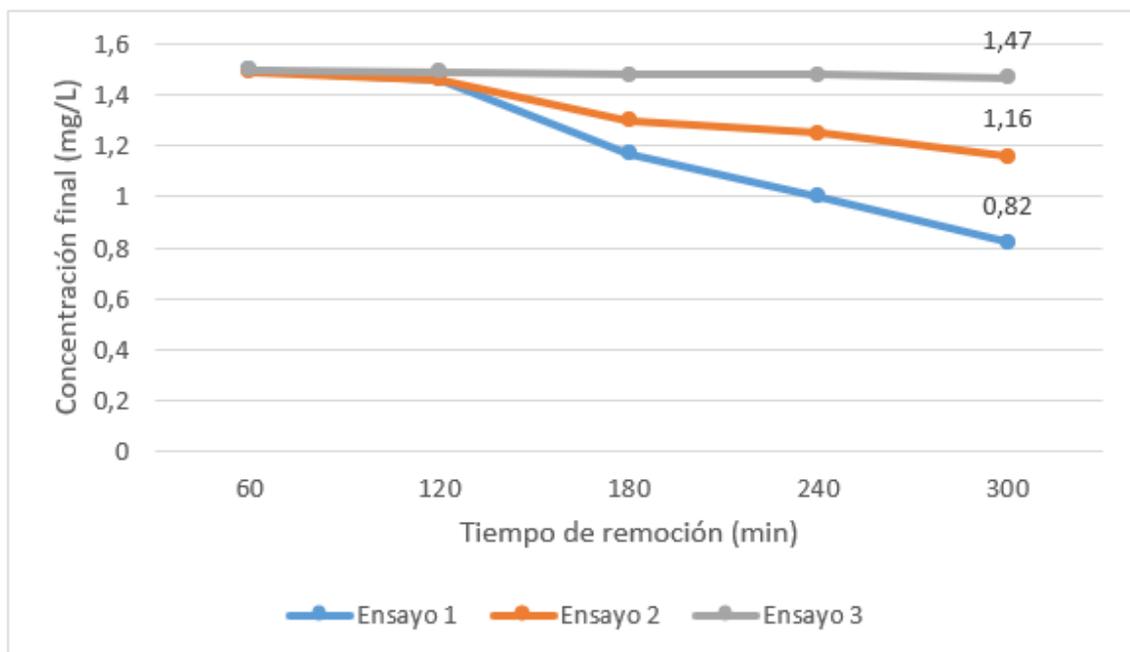


Figura 9: Concentración de cadmio vs. tiempo de remoción en los ensayos E1, E2 y E3. Utilizando espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata

3.4. *Relación entre el porcentaje de remoción y tiempo de remoción*

En la Figura 10, podemos observar que el mayor porcentaje de remoción alcanzado fue de 48,75 % en el ensayo 1 al término de los 300 min.

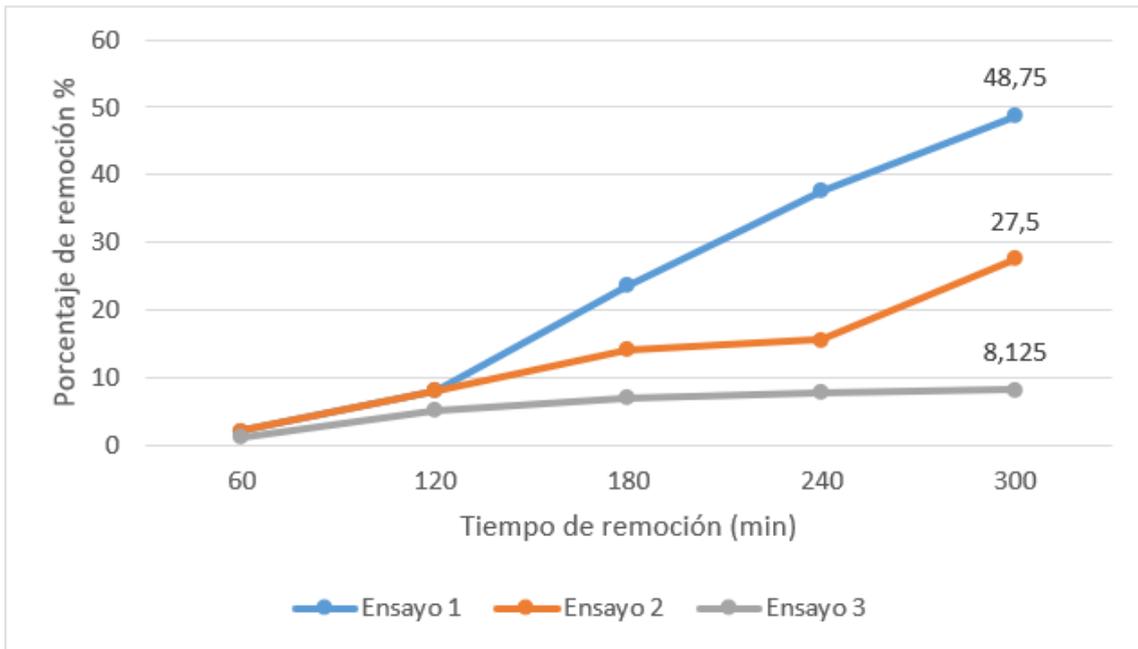


Figura 10: Tiempo de remoción y porcentaje de remoción ensayo E1, E2 y E3. 1

3.5. Relación entre el tiempo de remoción y capacidad de adsorción

En la Figura 11, se presenta la capacidad de adsorción para los tres ensayos.

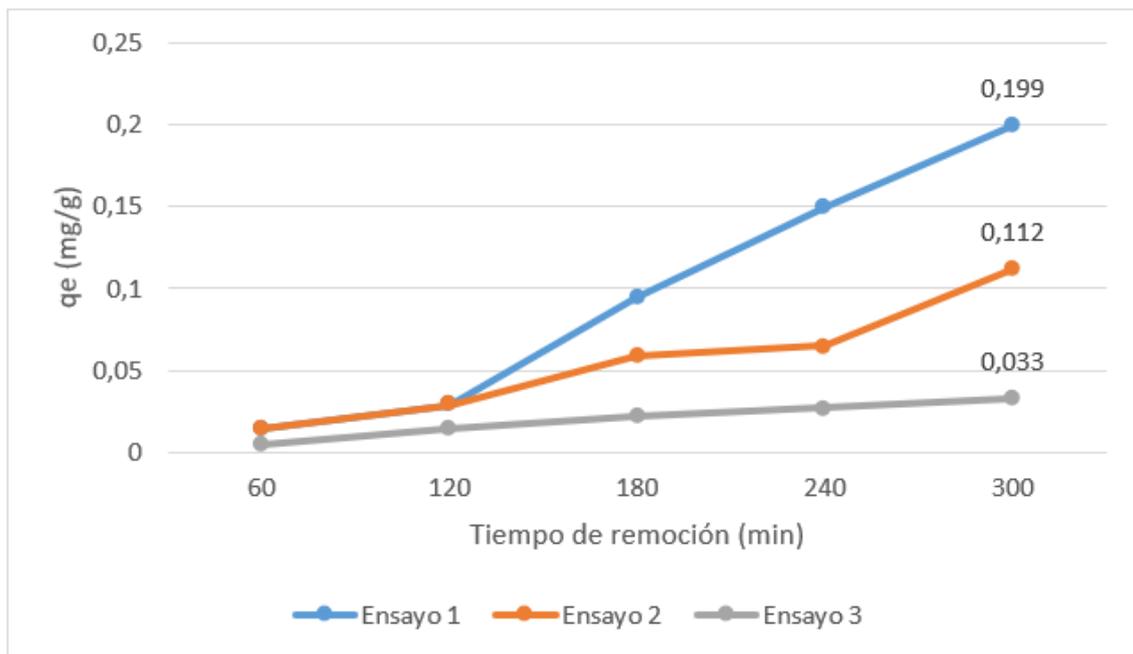


Figura 11: Tiempo de remoción y capacidad de adsorción ensayos E1, E2 y E3

3.6. Prueba de normalidad

La Tabla 5 presenta que la prueba de normalidad el nivel de significancia en Shapiro-Wilk fue mayor a 0,05. Por lo tanto, se aplicó la prueba paramétrica R Pearson (Tabla 6) para correlacionar las variables independientes con las variables dependientes. Variable independiente: tamaño de partícula de la espuma de poliuretano y tiempo de remoción de cadmio. Variable dependiente: concentración final de cadmio y porcentaje de remoción de

cadmio. Luego de realizar las pruebas de correlación con el estadístico R de Pearson y teniendo un nivel de confianza de 95 %, aceptamos la hipótesis general: La espuma de poliuretano como adsorbente sí adsorbe el cadmio presente en el agua del estero “El Macho” de la ciudad de Machala.

Tabla 5: Prueba de normalidad de los datos obtenidos

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	G1	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Concentración final	0,299	15	<0,001	0,789	15	0,203
Porcentaje de remoción	0,368	15	<0,001	0,664	15	0,091
Tamaño de partícula	0,269	15	0,005	0,776	15	0,082
Tiempo de remoción	0,153	15	0,200*	0,902	15	0,103
*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.						
a. Corrección de significación de Lilliefors						

Tabla 6: Correlación entre las variables tamaño de partícula y concentración final de cadmio

Correlaciones			
		Tamaño de partícula	Concentración final Cd
Tamaño de partícula	Correlación de Pearson	1	0,552*
	Sig. (bilateral)		0,033
	N	15	15
Concentración final	Correlación de Pearson	0,552*	1
	Sig. (bilateral)	0,033	
	N	15	15
*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).			

4. Discusión

La tendencia lineal de las isothermas según el modelo de Langmuir en las condiciones experimentales, Figura 6, sugiere que el proceso puede estudiarse utilizando el modelo seleccionado. El coeficiente de correlación lineal r^2 del ajuste al modelo de Langmuir fue 0,94 y de Freundlich fue 0,88, Figura 7 y Tabla 4. Por lo tanto, el modelo de isoterma de adsorción que mejor se ajustó a esta investigación fue el de Langmuir. El resultado obtenido para r^2 por el modelo de Lagmuir concuerda con los resultados reportados por Shamsi et al. (2017), quienes utilizaron espumas de poliuretano modificadas con ácido bis- [2-etilhexil] fosfórico para adsorber cadmio y reportan un valor para $r^2=0,97$. Nuestros resultados, además, coinciden con los reportados por Zhou et al. (2015), quienes utilizaron gel de polisiloxano-óxido, un tipo de espuma de poliuretano, modificado con grafeno como un adsorbente renovable y altamente eficiente para la eliminación de plomo y cadmio de aguas residuales; los autores reportan que la correlación lineal para la isoterma de Langmuir fue

$r^2=0,99$. El estudio de las isotermas de adsorción sugiere alta la afinidad del adsorbato por el adsorbente.

En las micrografías mostradas en la Figura 8, podemos observar al metal en forma de pequeñas partículas adheridas a la espuma. Este resultado confirma que el metal incorporado a la espuma de poliuretano tiene un tamaño nanoparticulado.

El resultado mostrado en la Figura 9, sugiere que la espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata es efectiva para remover cadmio de aguas contaminadas con este metal. Según Tejada Tovar et al. (2015), la adsorción tiene lugar en el interior de las partículas, sobre las paredes de los poros en puntos específicos. La cantidad de adsorbato que se puede adsorber es directamente proporcional al área externa; donde un conglomerado de partícula pequeña, de tamaño nanométrico, tiene mayor área superficial de adsorción, lo cual concuerda con el resultado obtenido en el ensayo 1, Figura 9, en el que se trabajó con el menor tamaño de partícula de la espuma de poliuretano de forma cúbica (0,5 cm de lado).

En el ensayo mostrado en la Figura 10, se utilizó un tamaño de partícula cúbica de espuma de poliuretano de 0,5 cm de lado, comprobándose que a menor tamaño de partícula mayor será el porcentaje de remoción de cadmio en aguas contaminadas por este metal. En la Figura 10, además, se muestra que en el ensayo 1 se logró la mayor capacidad de adsorción, 0,199 mg/g, resultado que indica nuevamente que la espuma de poliuretano modificada con nanopartículas de plata presentó un comportamiento en función al tamaño de partícula y capacidad de adsorción de cadmio en aguas contaminadas con este metal.

El resultado presentado en la Figura 12, concuerda con los de Ramírez, (2017), quien reporta que el Cd (II) contenido en muestras de agua del estero "El Macho" de la ciudad de Machala, supera los valores máximos especificados en la normativa ambiental ecuatoriana (para cadmio hasta 10,6 veces), por lo que se considera que el agua está contaminada con este metal pesado.

En esta investigación se comprobó que las propiedades de adsorción del adsorbente mejoraron en aproximadamente un 50 % con la adición de nanopartículas de plata para la eliminación de cadmio del agua contaminada. Según Zlate et al. (2013), la modificación química de este tipo de adsorbentes ofrece una alternativa para la eliminación de metales pesados de aguas contaminadas y protección ambiental. Por otro lado, Sayed y Burham (2017), afirman que prepararon con éxito un nuevo adsorbente nanocompuesto de espuma de poliuretano/organobentonita/óxido de hierro mediante polimerización in situ de diisocianato de tolueno y polirol en presencia de 5 % en peso de organobentonita/óxido de hierro. La eliminación por adsorción de cadmio sobre el nanocompuesto alcanzó un contenido máximo de adsorbente de 1,5 g/L, pH 6, y el equilibrio se estableció en 60 min. Los estudios mencionados sugieren que la espuma de poliuretano modificada con diferentes compuestos favorece las condiciones para un mayor porcentaje de remoción de metales pesados en aguas contaminadas.

5. Conclusiones

Se evaluaron tres ensayos para identificar las variables de diseño con las cuales lograr un mayor porcentaje de remoción de Cd (II) de las aguas del estero "El Macho", utilizando un reactor tubular vertical con agitación de 70 rpm y espuma de poliuretano sometida a un pretratamiento con nanopartículas de plata. Los parámetros de diseño que mejor se ajustaron para remover la mayor cantidad del metal fueron: temperatura de 27 oC, pH 8, tiempo de remoción 300 min, tamaño de la espuma de poliuretano de poliuretano de forma cubica 0,5 cm de lado, masa de adsorbente 1,5652 g. Se logró un porcentaje de remoción del 48,75 %. Los resultados indican que la concentración de cadmio en el estero "El Macho" supera el valor de criterio de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuario establecidos en el Anexo 1 del Libro VI del TULSMA. La remoción de cadmio de las muestras confirmó que la espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata es útil para el tratamiento de aguas contaminadas. La finalidad con la que se realizó el presente trabajo de investigación fue alcanzar un porcentaje de remoción del 99 % de cadmio; sin embargo, se logró 48,75 %, valor considerado como un buen resultado como punto de partida para futuras investigaciones en este ámbito.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Romero, H.	Escudero, M.	Solano, L.
Conceptualización			
Análisis formal			
Investigación			
Metodología			
Recursos			
Validación			
Redacción – revisión y edición			

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe conflictos de interés de naturaleza con la presente investigación.

Referencias

- Andrade Mera, A. A. y Carrión Chamba, W. V. (2018). *Plan de manejo para la recuperación ambiental del estero El Macho, cantón Machala* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Amézquita, E. (2018). *Remoción de Cadmio Bivalente (Cd⁺²) mediante bioadsorción en un sistema de flujo continuo empacado en biomasa muerta e inmovilizada de *Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing 1833 a escala de laboratorio* (tesis de pregrado). Universidad de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.

- González, M. & Rivada, M. (2016). Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizante. *Revista Arquitectura e Ingeniería*, 10(2), 1-12. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6368188>
- Huamaní, J. & Huamolle, A. (2017). *Remoción de cadmio en soluciones acuosas usando nanopartículas de hierro cerovalente sobre una matriz de quitosato* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Lenntech. (2021). *Propiedades Químicas Del Cadmio*.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas*. 2021.
- Ramírez, A. (2017). *Determinación del cadmio, plomo en agua y sedimento del estero el Macho de la ciudad de Machala*. (tesis doctoral). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Sáenz, A. & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
- Sayed, M. y Burham, N. (2017). Removal of cadmium (II) from aqueous solution and natural water samples using polyurethane foam/organobentonite/iron oxide nanocomposite adsorbent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(7). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/318136576_Removal_of_cadmium_II_from_aqueous_solution_and_natural_water_samples_using_polyurethane_foamorganobentoniteiron_oxide_nanocomposite_adsorbent
- Shamsi, Z., Yafthian, M.R., Parizanganeh, A. H. & Zamany, A. A. (2017). Wastewater Treatment by Using Polyurethane Foams Modified with Bis-[2-ethylhexyl] Phosphoric Acid: Kinetics, Equilibrium and Desorption Studies. *Journal of Human, Environmet and Health Promotion*, 3(1), 28-37. Recuperado de: <http://zums.ac.ir/jhehp/article-1-140-en.html>
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á. & Garcés Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123. Recurepado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992015000100010&script=sci_abstract&tlng=pt
- Zhindón, R., Cartuche, D., España, P. & Maldonado, M. (2018). Evaluación ambiental de aguas residuales: estero y manglar El Macho de la ciudad de Machala. *2do Congreso Internacional de Tecnologías para el desarrollo*. Universidad Técnica de Machala, Machala.
- Zhou, G., Liu, C., Tang, Y., Luo, S., Zeng, Z., Liu, Y., Xu, R., y Chu, L. (2015). Sponge-like polysiloxane-graphene oxide gel as a highly efficient and renewable adsorbent for lead and cadmium metals removal from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 280, 275-282. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.041>
- Ziegler, K. (2013). *Activación de espuma de Poliuretano con nanopartículas de Ag y evaluación de sus propiedades catalíticas* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, España.
- Veličković, Z., Bajić, Z., Ristić, M., Đokić, V., Marinković, A., Uskoković, P., & Vuruna, M. (2013). Modification of multi-wall carbon nanotubes for the removal of cadmium, lead and arsenic from wastewater. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 8(2), 501-511. Recuperado de: <https://technorep.tmf.bg.ac.rs/handle/123456789/2411>