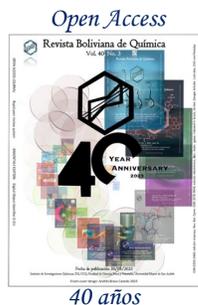




40 años



Revista Boliviana de Química 40 años

ISSN 0250-5460 Rev. Bol. Quim. Paper edition

ISSN 2078-3949 Rev. boliv. quim. Electronic edition

Received 01 18 2023 Accepted 08 20 2023 Published 08 30 2023

Vol. 40, No.3, pp. 71-79, Jul./Ago. 2023, Revista Boliviana de Química

Vol. 40, Issue 3, 71-79, Jul./Aug. 2023, Bolivian Journal of Chemistry

DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.3.2>

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE ADSORCIÓN DE PLOMO (II) EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE UN COMPÓSITO FORMADO POR LOSAS Y CERÁMICA

Original article

Peer-reviewed

Silvana Vizcarra N.¹, Pavel Delgado-Sarmiento^{1,*}, Edwin Urday U.², Mara Linares P.¹, Rosario Canahuire P.^{1,2}

- ¹ Thermodynamics Laboratory Professional School of Chemical Engineering, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa UNSA, Av. Independencia s/n, phone +5154226447, Arequipa, Perú, iquimica@unsa.edu.pe, <http://fip.unsa.edu.pe/ingquimica>
- ² Centro de Microscopía Electrónica, Facultad de Ingeniería de Procesos, Universidad Nacional de San Agustín, Av. Venezuela S/N, <https://fip.unsa.edu.pe/centro-de-microscopia-electronica/>

Keywords: Adsorption, Lead, Flagstone, Ceramic, Composite. **Palabras clave:** Adsorción, Plomo, Piedra laja, Cerámico, Compósito.

ABSTRACT

Determination of optimal adsorption parameters of lead (II) in industrial wastewater through a composite formed by flagstone and ceramic. The problem of water contamination by lead, derived from mining activity, demands new decontamination methodologies by adsorption.

The use of some waste from civil works coatings as an adsorbent was investigated. This is the case of ceramics, and waste from the exploitation of flagstone, an abundant resource in the region. A mixture of both materials was made in a proportion of 50% each to obtain a ceramic flagstone composite. Lead nitrate solutions of concentrations of 0.1 ppm and 0.2 ppm were prepared in volumes of 300 ml. These solutions were stirred at 500 rpm and 4 g/l and 8 g/l of the ceramic flagstone composite was added, keeping the pH constant at 5.5. The statistical analysis allowed us to conclude that the optimal adsorption parameters are the use of 8 g/l of composite and an adsorption time of 2 h. *Mail to: paveldsl@yahoo.com

RESUMEN

La problemática de la contaminación del agua por plomo, derivada de la actividad minera demanda nuevas metodologías de descontaminación por adsorción.

Se investigó sobre el aprovechamiento de algunos residuos de los revestimientos de obras civiles como adsorbente. Este es el caso del cerámico, y de residuos de la explotación de piedra laja, recurso abundante en la región. Se realizó una mezcla de ambos materiales en una proporción de 50% cada uno para la obtención de un compuesto de piedra laja cerámico. Se prepararon soluciones de nitrato de plomo de concentraciones de 0.1 ppm y 0.2 ppm en volúmenes de 300 ml. Dichas soluciones se llevaron a agitación a 500 rpm y se añadieron 4 g/l y 8 g/l del compuesto piedra laja cerámico, manteniéndose el pH constante a 5.5. El análisis estadístico permitió concluir, que los parámetros óptimos de adsorción son la utilización de 8 g/l de compuesto y un tiempo de adsorción de 2h.

INTRODUCCIÓN



La importante producción de plomo en Perú conlleva contaminación ambiental de origen químico, así como elevados montos de relaves mineros [1]. Se han encontrado niveles de elevada contaminación por plomo, tanto en zonas mineras como La Oroya [2], así como en puertos de exportación como el Callao, [3].

En su estado común el plomo es un metal sólido, pesado, denso y de color gris azulado, con diversos isótopos y altos niveles de toxicidad. Esta toxicidad ha prohibido su utilización en diversos ámbitos, como el de la plomería, esto, debido a que este elemento se absorbe de diversas maneras y ocasiona daños concretos de tipo neurotóxico, renal, cardiovascular, hematológico y gastrointestinal [4]. El plomo afecta todos los órganos y sistemas del cuerpo humano. Actúa como agonista o antagonista de las acciones del calcio y se relaciona con proteínas que poseen los grupos sulfhídricos, amina, fosfato y carboxilo [5].

En el Perú, la calidad de agua queda definida por condiciones y características establecidas en la normativa nacional, la cual, establece como límite 0.005mg/l de plomo para aguas tipo 3, y 0.01mg/l de plomo para agua tipo 2. Las diferentes industrias de proceso para cumplir con la normativa deben tratar sus efluentes.

Dentro de los diferentes métodos de tratamiento de aguas, la adsorción es un proceso eficiente y económico para la remoción de metales pesados en el agua. La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material [6]. Se trata de un fenómeno dinámico en el que continuamente se produce el choque y retención de las moléculas del fluido sobre la superficie del adsorbente, y la liberación y retorno de dichas moléculas a la fase fluida. Es evidente que la permanencia de las moléculas sobre la superficie del adsorbente determina, en promedio, una concentración superficial mayor que la correspondiente a la fase fluida. Aunque la superficie interfacial pueda ser cualquiera, es habitual que la denominación del proceso de adsorción se restrinja al caso de una superficie adsorbente sólida, y la sustancia que se adsorbe en adsorbente sólido es un adsorbato [7].

Este proceso puede ser realizado con una diversidad de materiales adsorbentes, algunos de los cuales, tienen un elevado costo. Entre algunas alternativas de bajo costo se encuentran las piedras Laja y las areniscas. La Piedra Laja corresponde al nombre comercial que reciben distintos tipos de rocas que tienen la propiedad de partirse en planos, dando lugar a formas de planchas tabulares más o menos finas (4-5 mm hasta 2-3 cm). En el Perú existen varios tipos de rocas que se encuadran en esta denominación, una de ellas y de gran potencial en la región de Arequipa son las areniscas de la formación Labra, de grano medio a fino, estratificación delgada y mayormente cuarzosa. Las areniscas con porcentajes de cuarzo más altos tienen un tamaño de grano fino-medio con una buena gradación y unos granos bastante redondeados [8].

Durante el procesamiento de la piedra laja, para luego ser vendida como revestimiento ornamental, se generan residuos que podrían ser aprovechados para la recuperación de aguas contaminadas con plomo. Por tanto, en el presente trabajo de investigación se planteó utilizar materiales de desecho como adsorbentes, como alternativa eficiente para la remoción de plomo. Los dos materiales utilizados fueron: restos de cerámicas de obras civiles y piedra laja, recurso abundante en la región Arequipa.

EXPERIMENTAL

Procedimiento de la elaboración de la muestra

Para la medición del parámetro Plomo se recolectaron 5 litros de muestra en la Zona del Río Torococha ubicado en el departamento de Puno, Perú, con coordenadas 15°29'28.5"S 70°06'39.0"W. Este parámetro fue analizado por espectrofotometría de absorción atómica dando como resultado 2.17 ppm de Plomo. Se prepararon diluciones de 0.10, 0.15 y 0.20, ppm de Plomo.

Recolección de piedra laja y del material cerámico

La piedra laja utilizada provenie de los yacimientos del distrito de Yura. Se tomaron las muestras del sector de Gramada distrito de Yura, ubicado en el departamento de Arequipa, Perú, con coordenadas 16°13'50.3"S 71°49'0.0"W. Los restos de cerámicos utilizados para los acabados en viviendas, fueron recolectados del Relleno Sanitario Quebrada Honda distrito de Yura con coordenadas 16°16'41.6"S 71°39'4.3"W para la elaboración del compósito.

Procesado del compósito



Ambos materiales fueron lavados con agua destilada para eliminar impurezas depositadas en ellos. Después, fueron secados bajo la sombra una semana. Posteriormente, se molieron en un molino de bolas de laboratorio Gilson LC-91F por separado. En ambos casos se utilizó la fracción pasante por el tamiz ASTM #200. La dosificación del compósito fue 50% de piedra laja y 50% de cerámico, se mezclaron ambos materiales y se homogenizaron.

Activación Química del compósito

El compósito se activó con ácido acético glacial al 25% m/v. La relación másica entre el compósito y la solución de ácido acético fue de 1:2 [9]. Una vez mezclados, la suspensión se agitó durante 4 horas. Posteriormente, la suspensión decantada, fue lavada con abundante agua destilada para eliminar el excedente de ácido hasta pH 5.5. El compósito fue secado en condiciones ambientales hasta que el contenido de humedad fuera menos del 8% de su peso. Se almacenó en desecador para ser utilizado posteriormente. Luego, se determinó la porosidad del compósito utilizando el Microscopio Electrónico de barrido FIB SEM Scios 2 Lo Vac Thermo Fisher Scientific -US.

Análisis estadístico

Se realizó el diseño factorial 2^k con $k = 3$ y con 3 puntos centrales. Se consideró 3 factores en un bloque, realizándose 11 pruebas en total, incluyendo los puntos centrales mencionados. En la tabla 1, se observa las variables de la investigación. Se obtuvo el modelo de concentración final de Pb en las muestras después de su tratamiento con el compósito a partir del diseño factorial [10,11].

Tabla 1: Variables del experimento

Variables independientes	Máximo	Mínimo	Punto central
Concentración inicial de plomo (mg/L)	0.2	0.1	0.15
Masa del adsorbente (g/L)	8	4	6
Tiempo de agitación (h)	2	1	1.5

Proceso de remoción de plomo con el Sistema Batch

Se utilizó la cantidad del compósito de acuerdo a la matriz experimental mostrada en la Tabla 2. Se realizaron los ensayos con tres niveles de masa del adsorbente, realizando las siguientes pruebas:

- 4 gramos del compósito por 1 L de agua en estudio: Muestras: 1,3,5,7
- 6 gramos del compósito por 1 L de agua en estudio: Muestras:9,10,11
- 8 gramos del compósito por 1 L de agua en estudio: Muestras:2,4,6,8

Adsorción de plomo por el compósito (piedra laja y cerámico)

En un vaso de precipitados se añadió una cantidad de la muestra de agua de estudio y el compósito activado de acuerdo al diseño factorial. La mezcla fue agitada de acuerdo a los tiempos de agitación del diseño a una velocidad constante de 500 RPM. Se obtuvo una mezcla sólido-líquido, la cual se filtró en papel filtro de tránsito lento. Las masas filtradas se llevaron a caracterizar por SEM-EDS. Luego se procedió a determinar la concentración remanente de Pb en el agua de estudio por el método 200.7 de la EPA, método de espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivo, para analizar trazas de metales en agua y desechos.

Análisis del compósito piedra laja con cerámica, y su adsorción de plomo por SEM-EDS

Para el análisis de las muestras se aplicó un recubrimiento a las muestras bajo vacío. Se fijaron las muestras al porta muestras con cinta de carbono. Se realizó el doble recubrimiento “sputtering” de oro (1 minuto y 30 segundos) y para el microanálisis por Rayos X el recubrimiento por hilo de carbono (Recubridor Quorum, Modelo Q150R ES Plus). Luego, se realizó la observación en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y el Análisis de Dispersión de Rayos X, EDS, en el equipo FIB-SEM Scios 2 Lo Vac. Se obtuvieron imágenes a aumentos de 10000x y 20000x por el SEM. Además, se obtuvieron los espectros elementales de medidas puntuales además de la composición química que se encuentran en la superficie adsorbente (SEM-EDS).



Análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica

Para el análisis de soluciones se utilizó el equipo SpectraAA Espectrofotómetro de absorción atómica Varian con llama (AAS-240 FS). Se siguió el Método estándar para examinar aguas y aguas residuales APHA-AWWA-WEF, Parte 3000, Método 3111-B: Metales por espectrometría de absorción atómica de flama aire-acetileno 23 nd Ed. 2017. Se procedió a optimizar el equipo con Cu de 5 ppm para estabilizarlo. Las curvas de calibración para la absorción de Pb se realizaron con soluciones estándar nitrato de plomo a la longitud de onda de 283.3 nm. Finalmente, se procedió a la lectura de las muestras de agua antes de la adsorción.

Análisis mediante espectrofotometría de emisión atómica

Para la cuantificación de Plomo se utilizó el equipo Varian Inc.- Vista-PRO ICP-OES simultáneo. Se siguió el Método para Metales Totales por ICP-MS:EPA 6020 b, Rev.2 2014: Espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo. Las muestras de aguas, después de su tratamiento con piedra laja y cerámica, fueron nebulizadas en forma de aerosol y fueron transportadas por el Argón a la antorcha de plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de emisión atómicos, los cuales fueron detectados. La información fue procesada por el programa Spectra.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de laboratorio usando la técnica de espectrofotometría de emisión atómica para la medición de Pb se detallan en la tabla 2. También se muestran los valores de las variables según el modelo del diseño experimental. Se observa una alta adsorción de Plomo por el compuesto piedra laja y cerámico.

Tabla 2. Matriz de resultados sobre el porcentaje de adsorción de Pb bajo diferentes condiciones del proceso de adsorción en una muestra de agua del río Torococha

Pruebas	Punto Central	Masa del Adsorbente (g/L)	Tiempo de tratamiento (horas)	Pb inicial (mg/L)	Pb final (mg/L)	%de adsorción
1	1	4	1	0.1	0.015	85
2	1	8	1	0.1	0.0030	97
3	1	4	2	0.1	0.0068	93.2
4	1	8	2	0.1	0.0015	98.5
5	1	4	1	0.1	0.0164	91.8
6	1	8	1	0.2	0.016	92
7	1	4	2	0.2	0.012	94
8	1	8	2	0.2	0.01	95
9	0	6	1.5	0.2	0.009	94
10	0	6	1.5	0.15	0.0105	93
11	0	6	1.5	0.15	0.012	92

En la tabla 2, se observan valores iniciales de plomo en la solución, y a su vez, la disminución de dichos valores después del tratamiento (85-98.5% de remoción) los cuales son similares [12].

En la imagen SEM del compuesto Laja-cerámico natural (Figura 1A), se observa los microporos del compuesto con tamaños entre 230.5nm y 1.133 μm antes de la adsorción. Así mismo, en las partículas de laja-cerámico se visualiza que existe una acumulación de microcristales en la superficie después de la adsorción de plomo (Figura 1B).

Para realizar el estudio de la composición elemental del compuesto adsorbente luego del proceso de adsorción de Pb, se tomó 1 punto (spot 1). Inicialmente, se realizó una exploración inicial a través de las longitudes de onda, y luego se programó el instrumento para examinar más de cerca las longitudes de onda que produjeron picos fuertes.



La figura 2 muestra el espectro elemental donde se observan picos fuertes para el silicio, plomo, aluminio y oxígeno. [13].

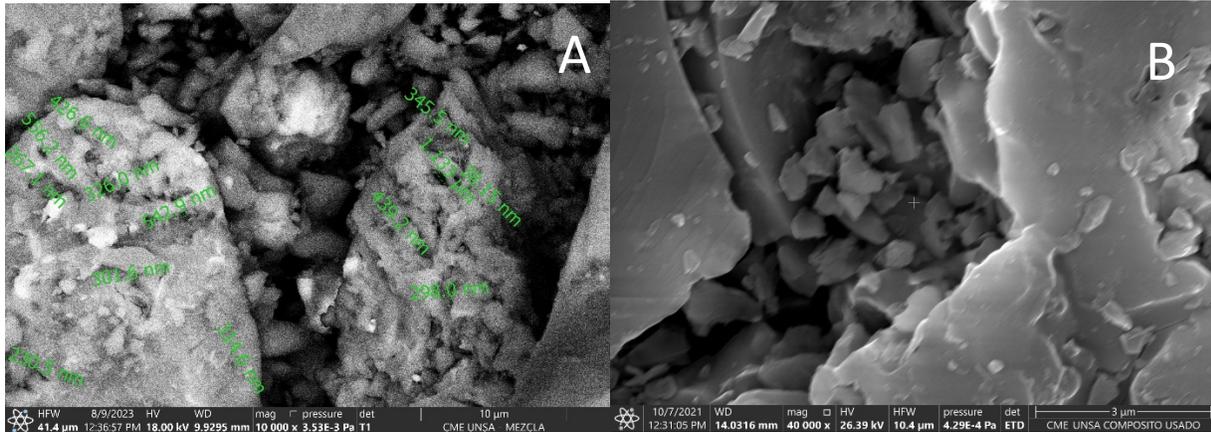


Figura 1. Vista microscópica de microfiltros, imagenes SEM de piedra laja-ceramico: A) Antes de la Adsorción .B) Después de la adsorción de Pb

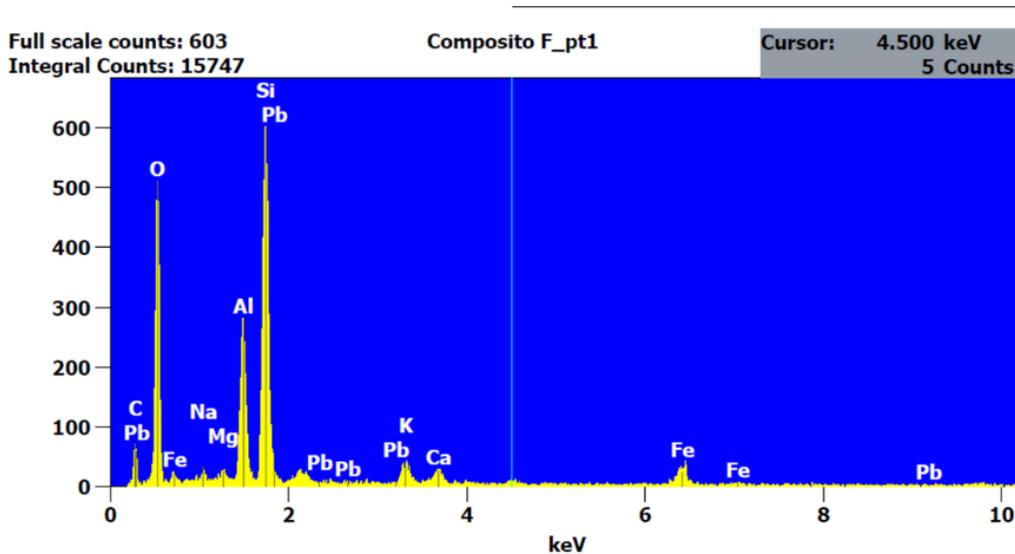


Figura 2. Espectro EDS del compuesto luego del proceso de adsorción de Pb

Tabla 3. Composición simple del compuesto piedra laja-cerámico después de la adsorción de Pb

Elemento	%Peso	%P. Atómico
Silicio (Si)	22.52	15.36
Aluminio (Al)	9.37	6.65
Plomo (Pb)	0.23	0.02
Oxigeno (O)	48.60	58.20

En la tabla 3 se observa la composición química simple del compuesto después de la adsorción de Pb. Como se esperaba, se encuentra un alto contenido de sílice porque es un componente principal del compuesto piedra laja-cerámico. Así también, se observa la presencia de plomo adsorbido por el compuesto.

Resultados del análisis de varianza ANOVA



40 años



La tabla 4 muestra los resultados del análisis factorial 2^k con 3 factores que son la masa del adsorbente, tiempo, y concentración inicial de Pb.

Tabla 4. Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Masa del Adsorbente (g/L)	1	42.781	42.7812	57.99	0.005
Tiempo (h)	1	27.751	27.7512	37.62	0.009
Concentración inicial Pb	1	0.101	0.1013	0.14	0.736
Masa del Adsorbente (g/L)*Tiempo (h)	1	4.351	4.3513	5.9	0.093
Masa del Adsorbente (g/L) *Concentración inicial Pb	1	32.401	32.4012	43.92	0.007
Tiempo (h)*Concentración inicial Pb	1	2.531	2.5312	3.43	0.161
Masa del Adsorbente (g/L) *Tiempo (h)*Concentración inicial Pb	1	7.031	7.0312	9.53	0.054
Error	3	2.213	0.7377		
Total	10	119.162			

Los resultados muestran que el factor a (Masa del Adsorbente) y el factor b (tiempo) influyen en el porcentaje de adsorción de Pb con un nivel de significancia menor del 5%. Por otro lado, las interacciones dobles: masa del adsorbente(g/L) *concentración inicial Pb con un valor -P menor que 0.05 indican que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

La masa del adsorbente tiene un p-valor de 0.005, por lo cual, se toma como decisión que el $p\text{-value} < \alpha$ y se rechaza la hipótesis nula, lo mismo con el tiempo que tiene un p-valor de 0.009.

Estimación de los efectos de los factores e interacciones

La tabla 5 muestra los efectos de los factores que tienen influencia en la variable respuesta. Esto significa que la de Masa del Adsorbente (g/L) y el tiempo son estadísticamente significativos en el nivel de significancia de 0.05. Es decir, que los cambios en estas variables están asociados con los cambios en la variable de respuesta (porcentaje de adsorción de Pb). El coeficiente para el efecto principal Masa del Adsorbente (g/L) representa el cambio como un incremento de 4.625 en la respuesta media y de 3.725 de incremento en el tiempo. Lo mismo sucede con la interacción Masa del Adsorbente (g/L) *Concentración inicial Pb. Por otro lado, los otros términos incluidos en el modelo se mantienen constantes o no influyen significativamente en la variable respuesta.

Tabla 5: Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del Coef.	Valor T	Valor p
Constante		93.227	0.259	360	0
Masa del Adsorbente (g/L)	4.625	2.313	0.304	7.62	0.005
Tiempo (h)	3.725	1.863	0.304	6.13	0.009
Concentración inicial Pb	-0.225	-0.113	0.304	-0.37	0.736
Masa del Adsorbente (g/L) * Tiempo (h)	-1.475	-0.738	0.304	-2.43	0.093
Masa del Adsorbente (g/L) * Concentración inicial Pb	-4.025	-2.012	0.304	-6.63	0.007
Tiempo (h) * Concentración inicial Pb	-1.125	-0.563	0.304	-1.85	0.161
Masa del Adsorbente (g/L) * Tiempo (h)*Concentración inicial Pb	1.875	0.937	0.304	3.09	0.054

Gráficos factoriales

Gráficas de efectos estandarizados y diagrama de Pareto

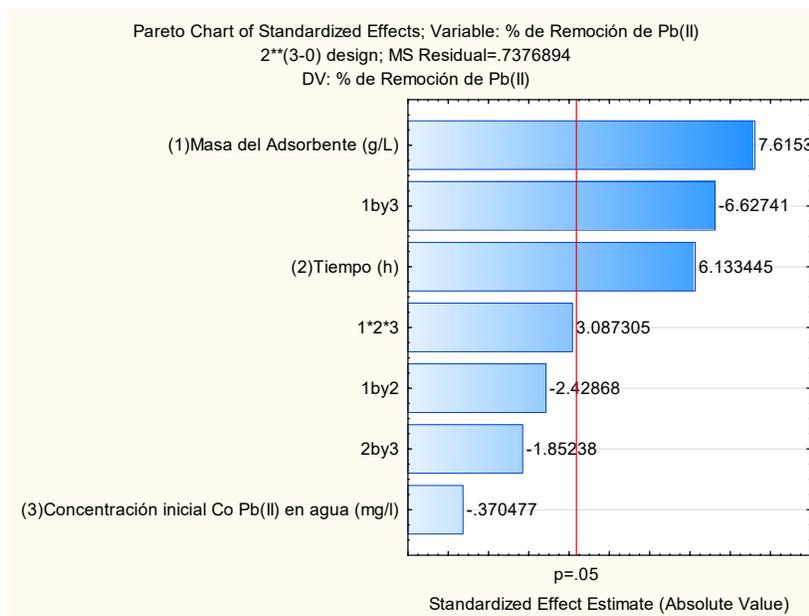


Figura 3. Diagrama de Pareto

En la figura 3 del Diagrama de Pareto se observa que dos efectos principales son estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). Estos efectos significativos incluyen los dos efectos principales, Masa de adsorbente y Tiempo.

Se puede notar que el efecto más significativo es el factor masa de adsorbente (g/L), pero debe observarse que el efecto es positivo, es decir, incrementa el porcentaje de adsorción de plomo. No así, con el efecto de la interacción (1)x(3). Asimismo, es importante resaltar que el Tiempo también tiene una influencia significativa a diferencia de las demás interacciones. Por otro lado, el efecto del factor (3) no tiene influencia en la Concentración final de Plomo, en la solución tratada (mg/L).

La gráfica de efectos principales de la figura 4 muestra que el efecto masa del adsorbente cambia significativamente aumentando el porcentaje de remoción de Pb cuando pasa de nivel inferior al superior. El mismo comportamiento se muestra en el factor Tiempo (horas).

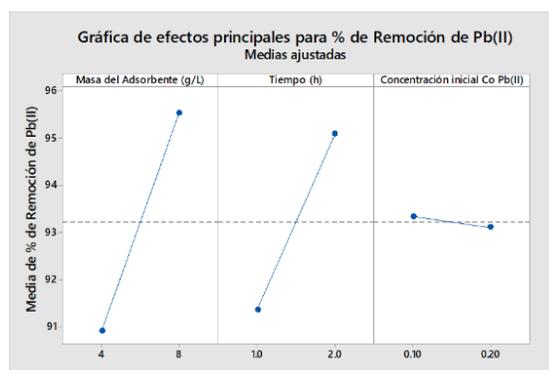


Figura 4. Efectos principales para porcentaje de Remoción de Pb. Medias ajustadas

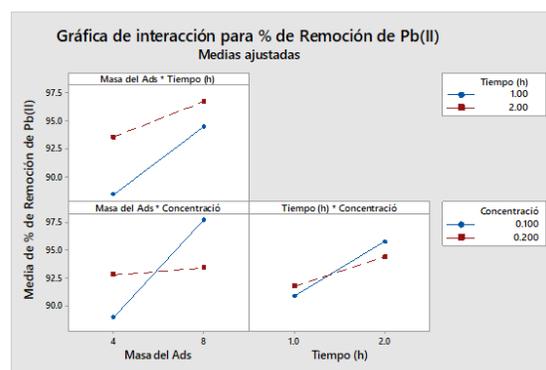


Figura 5. Interacción para porcentaje de Remoción de Pb – Medias ajustadas

La figura 5 muestra que la combinación de los factores dobles presenta una interacción, y por tanto, influyen en la variable respuesta. Se nota que la interacción Masa Adsorbente*Concentración y Tiempo*Concentración presentan valores medios de porcentaje de remoción de Pb menores que cuando interactúa los de Masa Adsorción*Tiempo.



Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Del análisis del diseño experimental se obtuvo el modelo matemático para la adsorción del Pb.

$$\begin{aligned} \% \text{ de remoción del Pb} = & 25.91 + 9.50 \text{ Masa del Adsorbente (g/L)} + 28.40 \text{ Tiempo (h)} \\ & - 3.550 \text{ Masa del Adsorbente (g/L)} * \text{Tiempo (h)} \\ & - 48.25 \text{ Masa del Adsorbente (g/L)} * \text{Concentración inicial Pb} \\ & + 18.75 \text{ Masa del Adsorbente (g/L)} * \text{Tiempo (h)} * \text{Concentración inicial Pb} \end{aligned}$$

En la figura 6 la gráfica de superficie de respuesta donde el color rojo intenso representa cuantificación de la variable porcentaje de remoción de Pb.

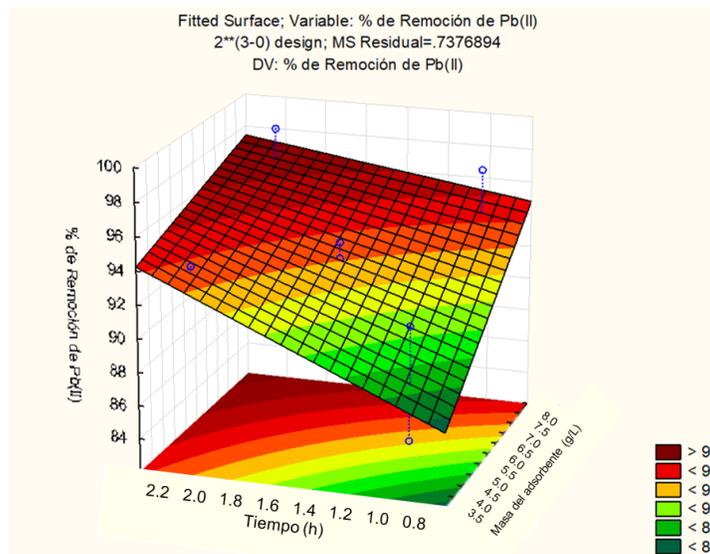


Figura 6. Gráfica de superficie de respuesta

En la figura 7 la gráfica de contorno donde el color rojo intenso representa cuantificación de la variable (%) de remoción del Pb.

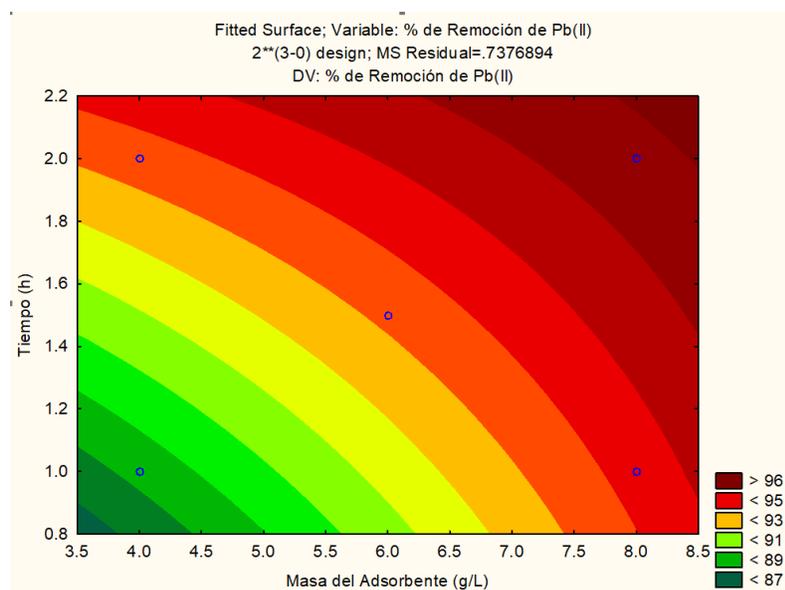


Figura 7. Gráfica de contornos



CONCLUSIONES

Se determinó que los parámetros óptimos de adsorción de Pb en aguas residuales con el compuesto piedra laja –cerámico es la masa de adsorbente de 8g/l y el tiempo de adsorción de 2 horas.

A partir de la mezcla de piedra laja y cerámico en un 50% cada uno, se obtuvo el compuesto. Éste demostró ser eficiente para ser utilizado como adsorbente. Mediante Microscopía Electrónica de barrido (SEM), se observó que el plomo fue depositado en el adsorbente.

La capacidad adsorbente del compuesto fue un 98.5% de adsorción, cuando la concentración inicial de Pb fue 0.1 ppm y el tiempo de adsorción de 2 horas. Esto muestra que el compuesto, compuesto por una mezcla de 50% material cerámico y 50% residuos de piedra Laja es un buen adsorbente para descontaminar aguas con metales pesados, como es el caso del plomo en el rango de concentraciones estudiadas.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la Escuela Profesional de Ingeniería Química por brindarnos el laboratorio de Termodinámica y al Centro de Microscopía Electrónica de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Agustín-Arequipa-Perú.

REFERENCIAS

1. Astete, J., Cáceres, W., Gastañaga, M. D. C., Lucero, M., Sabastizagal, I., Oblitas, T., Pari, J., Rodríguez, F. 2009. Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros, *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 26(1), 15-19.
2. Pebe, G., Villa, H., Cervantes, G. 2008, Niveles de plomo sanguíneo en recién nacidos de La Oroya, 2004-2005, *Rev Perú Med Exp Salud Pública*, 25(4), 355-360.
3. Vega-Dienstmaier, J.M., Salinas-Pielago, J.E., Gutierrez-Campos, M. 2006, Lead levels and cognitive abilities in Peruvian children, *Rev Bras Psiquiatr*, 28(1), 33-39. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-44462006000100008>
4. World Health Organization: WHO. 2023. Intoxicación por plomo y salud, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
5. Agency of Toxic Substances and Disease Registry, Case studies in environmental medicine, Lead toxicity. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, The Agency, Unidad de Gestión del País-Perú, 2010, Atlanta.
6. Giraldo, L., García, V., Moreno, J. 2008, Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados, *Revista de Ingeniería* 27, 7-16. DOI: <https://doi.org/10.16924/revinge.27.1>
7. Orihuela, E. 2015, Adsorción de disoluciones acuosas: isoterma de adsorción y coeficientes de difusión, (PhD Tesis), Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, Recuperado de: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/52719/1/5309859314.pdf>
8. Valdiviezo, A., Ramírez, J. 2010, Estudio Geológico Económico de Rocas y Minerales Industriales de Arequipa y alrededores, Boletín Ingemmet No 22, Serie B: Geología Económica, Recuperado de: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/215#files>
9. Montaña, D., Rosero, M., Torres, R. 2019, Arcillas activadas para el blanqueamiento del aceite de palma y remoción del colorante azul índigo carmín del agua, *Revista Producción + Limpia*, 14(2), 21-29. DOI: <https://doi.org/10.22507/pml.v14n2a2>
10. Hefne, J.A., Mekhemer, W.K., Alandis, N.M., Aldayel, O.A., Alajyan, T., Kinetic and thermodynamic study of the adsorption of Pb(II) from aqueous solution to the natural and treated bentonite, *International Journal of Physical Sciences*, Vol.3,(11), 281-288. <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/FF12D7915004.pdf>
11. Rodríguez, M.L., 2011, Adsorción de metales pesados mediante biocompuestos con base en quitina de diferentes grados de acetilación, (MSc Tesis), Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica , A.C., San Luis de Potosí, México, recuperado de <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/619/3/TMIPICYTR6A32011.pdf>
12. Rojas, Y., Mendez, F., Rondón, W., Rojas, L. 2016, Eliminación de plomo proveniente de fuentes acuosas utilizando nanotubos de carbono, *Avances en Química*, 11(2), 87-89. <https://www.redalyc.org/journal/933/93347418005/html/>
13. Fernández, C.S., 2012, Microscopía electrónica de barrido SEM(I) Concepto y usos, construcción Patología Rehabilitación, <https://www.patologiasconstruccion.net/2012/12/la-microscopia-electronica-de-barrido-sem-i-concepto-y-usos/>