

Predicción del arsénico remanente en la extracción con quitosano mediante un modelo polinomial basado en el método de superficie de respuesta (MSR).

F. Guzmán-Recino^{1,*}, D. Colorado-Garrido², B. A. Escobedo-Trujillo², B. A. Roger-Fouconnier¹

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Avenida Universidad, Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos, Veracruz, C. P. 96538, México.

² Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, Av. Universidad Km 7.5 Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos Veracruz, CP 96538, México

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, C.P. 96535, Coatzacoalcos, Veracruz, México.

* Correspondencia: feguzman@uv.mx

Cita: F. Guzmán-Recino, D. Colorado-Garrido, B. A. Escobedo-Trujillo, B. A. Roger-Fouconnier. Predicción del arsénico remanente en la extracción con quitosano mediante un modelo polinomial basado en el método de superficie de respuesta (MSR). Rev. INEMATD Science. 2026, 1, 14-24. <https://doi.org/10.67158/2dtrz624>

Editor académico: Gómez Rodríguez Cristian

Recibido: 24 de marzo de 2026

Revisado: 8 de junio de 2026

Aceptado: 21 de junio de 2026

Publicado: 22 de junio de 2026

Nota del editor: El comité editorial de Revista INEMATD SCIENCE se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

Copyright: © 2026 por los autores. Esta obra se distribuye bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Resumen

Se propone un modelo polinomial, expresado en variables codificadas y naturales, para predecir la cantidad de arsénico remanente tras la extracción de dicho contaminante en medio acuoso, empleando quitosano como adsorbente. Se aplica el Método de Superficie de Respuesta (MSR) considerando las condiciones de pH, tiempo de contacto, concentración de arsénico y concentración del adsorbente (quitosano) para proponer las condiciones óptimas que maximicen la remoción de arsénico. El modelo polinomial propuesto presenta una buena aproximación, ya que el coeficiente de determinación obtenido es de 0.9983. Se presentan las curvas de nivel y los análisis residuales para la validación del modelo. Este trabajo pretende ayudar a predecir el arsénico remanente y, así, disminuir la cantidad de experimentos necesarios en el análisis de la extracción de arsénico mediante quitosano.

Palabras clave: Diseño de experimentos, modelado predictivo, optimización, tratamiento de agua, adsorción.

1. Introducción

El arsénico es un metal pesado que se puede encontrar de manera natural en rocas y sedimentos; sin embargo, las concentraciones de este tienden a aumentar en el medio natural debido a las actividades humanas, tales como la quema de carbón, que suele realizarse en centrales eléctricas, en industrias de fundición de cobre y en el procesamiento de minerales [1]. En algunas ocasiones, este compuesto inorgánico es difícil de extraer del medio en el que se encuentra debido a diversas condiciones, como el pH [2]. Por otro lado, el arsénico es tóxico, al igual que los demás metales pesados, por lo que merece atención especial debido a su volatilidad, a su capacidad de bioacumularse en el ambiente y a que es potencialmente cancerígeno [3].

Debido a ello, se ha estado estudiando la implementación de diversos materiales y métodos que ayuden a su extracción, siendo el quitosano uno de los más empleados para

dicha extracción, el cual suele obtenerse del caparazón de mariscos. Esto se debe a que, aunque existen diversos métodos que pueden emplearse para remover el arsénico, como: oxidación/precipitación, coagulación, intercambio iónico y tecnología de membranas, el quitosano presenta bajo costo, se puede conseguir fácilmente, es biodegradable, no es tóxico y posee propiedades estructurales que favorecen la extracción del arsénico, ya que se lleva a cabo mediante el método de adsorción, el cual es uno de los métodos más simples y efectivos en remoción de contaminantes [4].

Generalmente, este tipo de análisis de extracción de contaminantes suele modelarse mediante el Método de Superficie de Respuesta (MSR), ya que se emplea en el análisis de procesos químicos. No obstante, también puede utilizarse a nivel ingeniería, ya que analiza los efectos de diversos parámetros de entrada ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) que puedan influir en una respuesta de salida, lo cual ayuda a reducir el número de experimentos realizados para el análisis de remoción de contaminantes mediante predicciones, tal como se ha hecho para el análisis de remoción de contaminantes como amoníaco [5], azul de metileno [6], plomo [7], entre otros. En este método se utilizan variables codificadas ($x_1, x_2, \dots, x_k$) en lugar de las variables naturales, las cuales son las variables que se encuentran en las unidades en las que se realizaron las mediciones [8]. En este caso, en unidades de concentración (mg/L), pH y tiempo (min). Las variables codificadas son variables adimensionales que facilitan analizar qué variables tienen mayor impacto en la respuesta del proceso, ya que permiten estimar los términos del modelo de forma independiente.

En el presente trabajo se busca proponer un polinomio en variables codificadas y otro en variables naturales que sea capaz de predecir la cantidad de arsénico remanente al aplicar quitosano como medio adsorbente en un medio acuoso, tomando en cuenta la variación de pH, tiempo de contacto, concentraciones de arsénico y concentraciones de adsorbente, y, al mismo tiempo, analizar la relación que presenta el tiempo de contacto con la cantidad de adsorbato inicial presente en el proceso de remoción.

2. Materiales y métodos

Se obtuvieron datos experimentales de Dehghani y colaboradores [9], quienes aplicaron el Diseño Compuesto Central (DCC) para determinar el número de ensayos y el rango de variación de los factores. Esto permitió analizar el efecto de la cantidad inicial de arsénico (200-400 mg/L), la cantidad de adsorbente (quitosano, 2-4 mg/L), el pH (4-6) y el tiempo de contacto (30-90 min) en un proceso de extracción de arsénico. Los datos se presentan en el Apéndice A.

Se utilizó el software RStudio 2021.09.1 con el Método de Superficie de Respuesta, el cual relaciona condiciones de entrada con la variable de salida analizada; en este caso, la variable de salida es el arsénico remanente (Ecuación 1), donde ε incluye los efectos de errores de medición y efectos externos que no pueden controlarse, como los niveles de humedad, cambio de las propiedades y envejecimiento del material [8] y se espera que presente una distribución normal con varianza constante y media cero.

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (1)$$

Sin embargo, el MSR analiza las variables codificadas ($x_1, x_2, \dots, x_k$) en lugar de las variables naturales ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$). Esto se debe a que la codificación permite analizar variables con diferentes unidades y órdenes de magnitud sin distorsionar su influencia,

asegurando que contribuyan de manera comparable a la respuesta del sistema [10]. Para realizar la transformación de variables se utiliza la Ecuación 2, en la cual se consideran los valores máximos, mínimos y centrales de los datos experimentales:

$$x_i = \frac{\xi_i - [\max(\xi_i) + \min(\xi_i)]/2}{[\max(\xi_i) - \min(\xi_i)]/2} \quad (2)$$

Una vez efectuado el cambio de variables, la aproximación se representa con la Ecuación 3:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (3)$$

En este contexto, el MSR se basa en el ajuste de un modelo polinomial de segundo orden (Ecuación 4) en términos de variables codificadas para representar el arsénico remanente (y), el cual permite describir la respuesta del sistema considerando tanto los efectos individuales como las interacciones entre las variables, además de incorporar el error experimental [7]. Sin embargo, este no permite describir el mecanismo de adsorción que se lleva a cabo [11].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Donde x_i y x_j son variables independientes codificadas, k indica el número de variables, β_0 es un término constante, β_i , β_{ii} y β_{ij} son los coeficientes asociados a los términos lineales, cuadráticos y de interacción, respectivamente [6, 7].

Para facilitar el análisis estadístico y el modelado, se asignaron factores a las variables experimentales estudiadas (Tabla 1). Los niveles de las variables de operación (A, B, C y D) se establecieron en tres niveles: -1 (mínimo), 0 (centro) y 1 (máximo). Para validar el modelo polinomial, se realizaron análisis de residuos mediante métodos analíticos y gráficos. Por otro lado, se empleó el MSR para analizar la interacción entre la cantidad inicial de arsénico y el tiempo de contacto durante la adsorción de arsénico sobre quitosano.

Tabla 1. Rango experimental y codificado de las variables de operación

Variable	Factor	Rango y niveles		
		-1	0	1
Cantidad de arsénico	A	194	295.5	397
Cantidad de quitosano	B	2	3	4
pH	C	4	5	6
Tiempo de contacto	D	45	65	75

3. Resultados

3.1. Modelo polinomial

Se presenta el modelo polinomial de segundo orden (Ecuación 5) propuesto en variables codificadas, el cual presenta unidades de concentración en mg/L:

$$As_{remanente} = 215.51 + 82.389A - 6.2633B + 1.7633C - 16.871D - 4.1386AB - 3.4787AD - 2.2633BD + 3.7744A^2 + 3.232D^2 \quad (5)$$

En el polinomio se utilizaron las cuatro variables de investigación (pH, tiempo de contacto, concentración de adsorbente y adsorbato), y se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9983, donde un valor de 1 representa el mejor ajuste posible, lo cual indica una buena correlación [12, 13]. Para verificar la consistencia del modelo, se compararon los datos predichos contra los valores experimentales [14, 15], como se muestra en la Figura 1. Los datos utilizados se encuentran en el Apéndice A. En dicha comparación se observó que los valores predichos coinciden con la mayoría de los valores objetivos experimentales (arsénico remanente), aproximándose a la recta identidad, con pendiente 1 e intercepto 0. Por lo tanto, según la gráfica, se puede suponer que el modelo presenta una buena correlación [15].

La comparación entre el arsénico remanente experimental y el predicho con respecto a cada variable de análisis se muestra en la Figura 2, en la cual se aprecia que la mayoría de los valores aproximados coinciden con los experimentales, lo que constituye otro indicio de que el modelo polinomial propuesto presenta una buena aproximación. Dicha figura se obtiene a partir de un seccionamiento de superficies de nivel en 3 dimensiones (Figura 3).

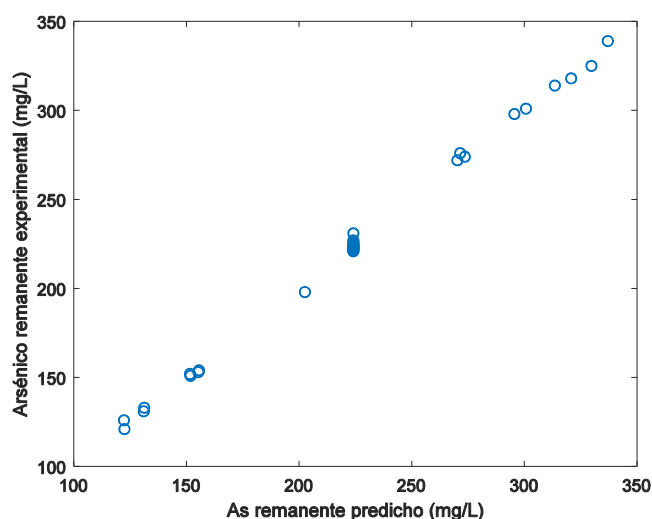


Figura 1. Arsénico remanente predicho contra el arsénico remanente experimental.

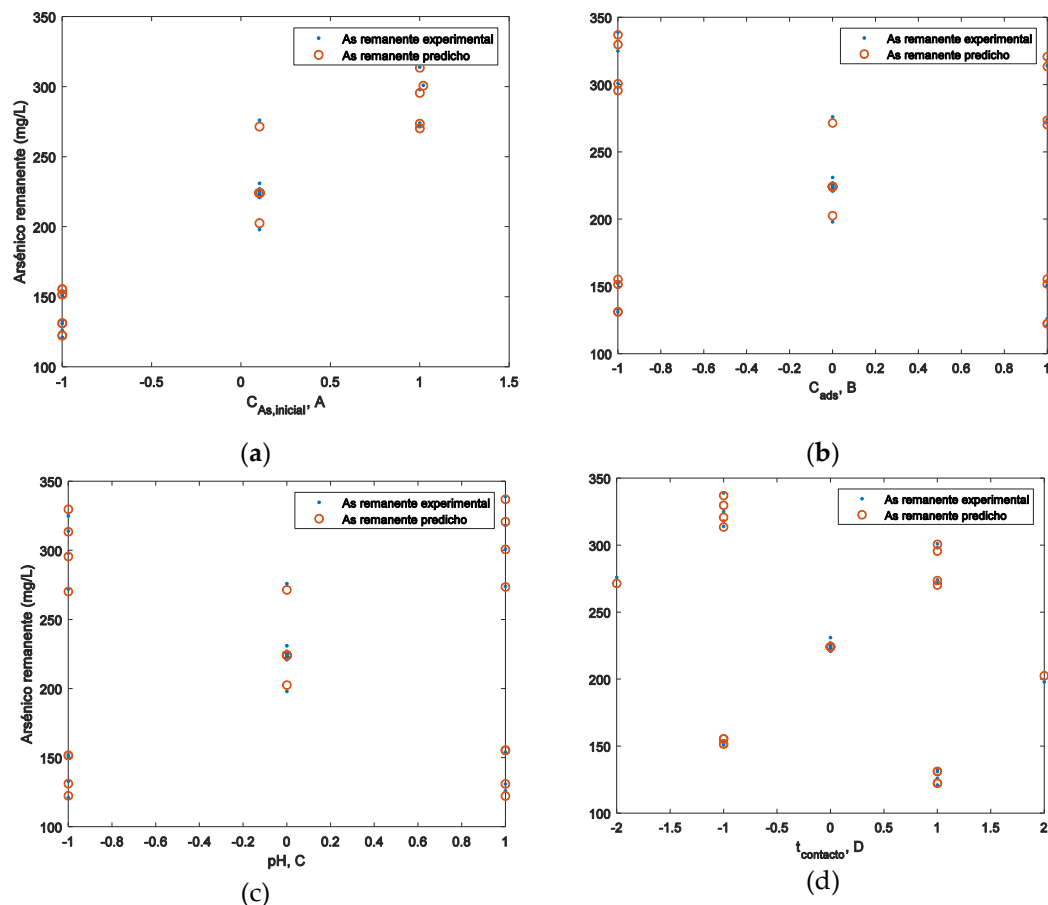


Figura 2. Curvas de nivel. Comparación entre el arsénico remanente experimental y el arsénico predicho para cada variable utilizada en el polinomio: (a) concentración inicial de arsénico; (b) concentración del adsorbente; (c) pH; (d) tiempo de contacto.

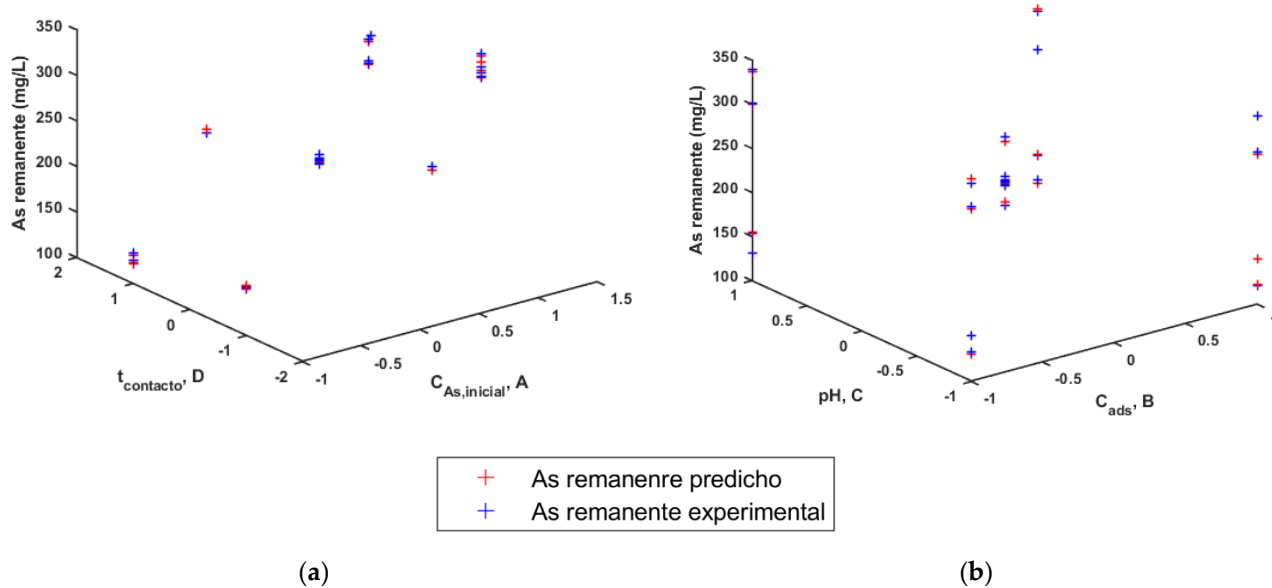


Figura 3. Superficies de nivel. Comparación entre el arsénico remanente experimental y el arsénico remanente predicho para las variables significativas del modelo polinomial:

(a) tiempo de contacto y concentración inicial de arsénico; (b) pH del medio y concentración del adsorbente.

3.2. Análisis estadístico

Al obtener el histograma de residuos estandarizados (Figura 4), se observa una distribución similar a la campana de Gauss, caracterizada por una distribución normal con media cero y varianza constante.

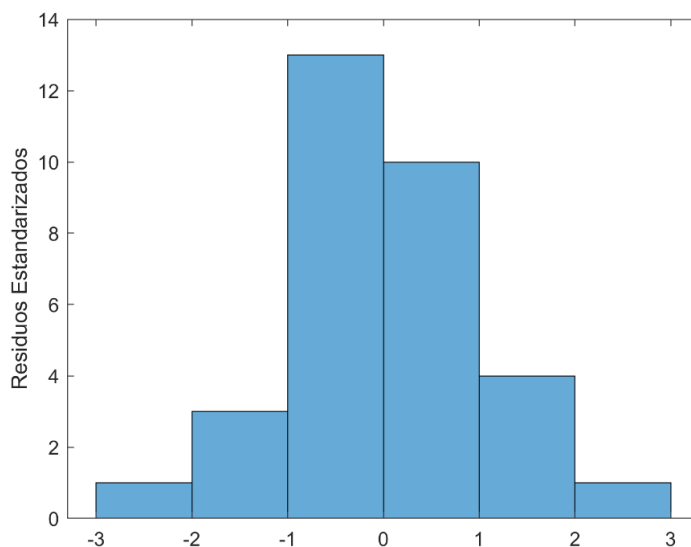


Figura 4. Histograma de residuos estandarizados.

Se empleó el método 3-sigma, utilizando líneas horizontales a 3 y -3 (Figura 5), para identificar posibles *outliers* que parecen estar presentes según el histograma de residuos estandarizados (Figura 4), ya que este no presenta una simetría perfecta. Sin embargo, no se pudo identificar ningún valor atípico, ya que el 100% de datos se encuentra dentro del intervalo comprendido entre 3 y -3. Asimismo, se puede observar que la distribución de los valores es aleatoria, lo cual permite suponer que el modelo es confiable debido a una varianza constante [7].

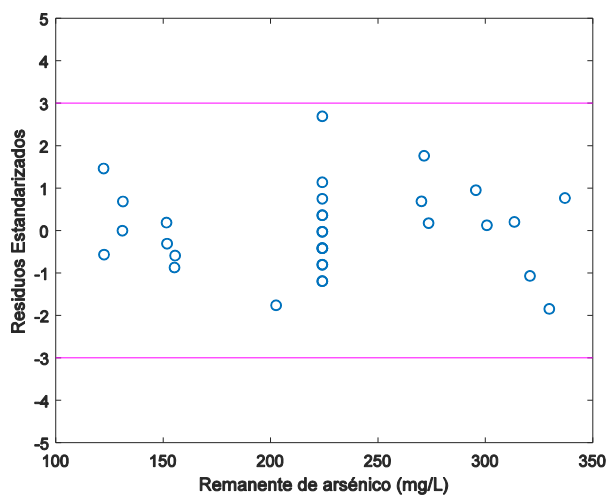


Figura 5. Residuos estandarizados de arsénico remanente, predicho y experimental.

Por otro lado, se obtuvieron los intervalos de confianza de los residuos con un nivel de confianza del 95 % (Figura 6), en la que los residuos se representan con puntos amarillos y los intervalos de confianza con líneas verdes. En dicha figura se aprecian 4 valores atípicos, que también pueden observarse en el histograma de residuos estandarizados. Al mismo tiempo, se observa que los residuos (ϵ) presentan media cero y varianza constante, lo que se traduce en un “efecto espejo” en los intervalos de confianza, debido a su anchura similar, lo cual indica que el valor es consistente y aleatorio en todo el rango de datos observados. Por consiguiente, los valores obtenidos indican que el modelo es viable [14].

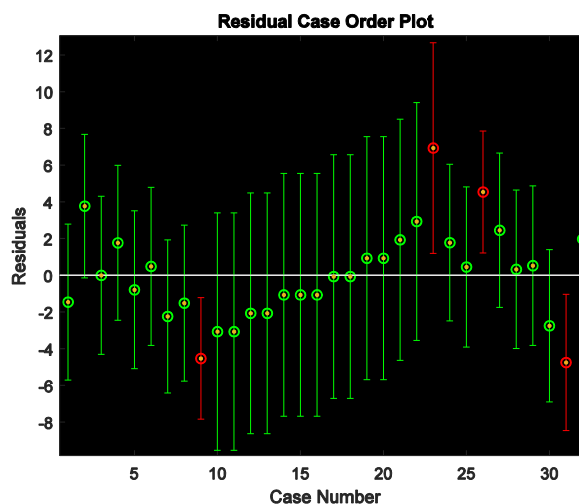


Figura 6. Intervalos de confianza en los residuos con un nivel de confianza del 95%.

El aporte de cada variable en el modelo se analizó mediante el Análisis de Varianza (ANOVA), Tabla 2. Cabe destacar que el *P-value* ayuda a distinguir entre resultados producto del azar del muestreo y aquellos estadísticamente significativos, lo cual contribuye a evaluar la validez del modelo [6, 14]. Para ello, se considera que un factor es altamente importante cuando $P\text{-value} < 0.001$, importante cuando $0.001 \leq P\text{-value} \leq 0.05$ y no importante cuando $P\text{-value} > 0.05$ [7]. Por tanto, en la Tabla 2 se observa que, con base en el *P-value*, todas las variables incluidas en el modelo polinomial son importantes y altamente importantes para lograr una buena aproximación.

Tabla 2. Coeficientes estimados del modelo polinomial de segundo grado y resultados de ANOVA.

Factor	Modelo cuadrático		
	Coeficiente estimado	Error estándar	<i>P-value</i>
A	82.3887	0.8136	<0.0001
B	-6.2633	0.8149	<0.0001
C	1.7633	0.8149	0.041593
D	-16.8712	0.6659	<0.0001
AB	-4.1386	0.8139	<0.0002
AD	-3.4787	0.8124	<0.0003
BD	-2.2633	0.8149	0.01098

A^2	3.7744	1.2052	0.004852
D^2	3.232	0.6160	<0.0001

El análisis de la interacción entre el tiempo de contacto y la concentración inicial de arsénico durante el proceso de adsorción se presenta en la Figura 7. En dicho análisis se empleó una concentración de adsorbente de 3 mg/L y un pH de 5. Con base en ello, se observa que la mayor cantidad de arsénico remanente se obtiene cuando el tiempo de contacto se sitúa entre 30 y 40 min y la concentración inicial de arsénico es alta. En contraste, la menor cantidad de arsénico remanente se alcanza con tiempos de contacto entre 60 y 90 min y concentraciones iniciales de arsénico entre 200 y 250 mg/L, condiciones en las que se favorece una mayor eficiencia de adsorción.

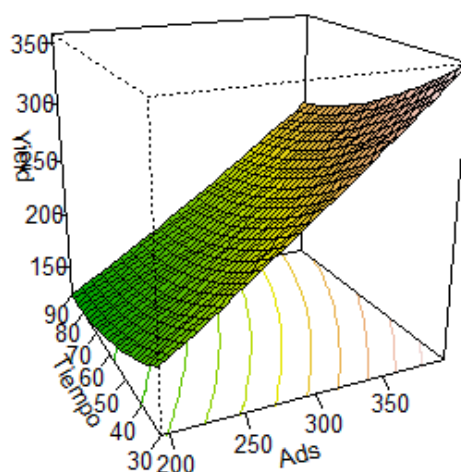


Figura 7. Respuesta de superficie de la interacción entre el tiempo de contacto y la concentración de arsénico inicial.

El modelo polinomial en términos de variables naturales (Ecuación 6) es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 As_{\text{remanente}} = & 32.99 + 0.85461(C_{As,\text{inicial}}) + 14.839(C_{ads}) + 1.7633(pH) - 1.7206(t) \\
 & - 0.040775(C_{As,\text{inicial}} * C_{ads}) - 0.0022849(C_{As,\text{inicial}} * t) - 0.15089(C_{ads} * t) \\
 & + 0.00036636(C_{As,\text{inicial}}^2) + 0.014364(t^2)
 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde: $C_{As,\text{inicial}}$ es la concentración inicial de arsénico (194–397 mg/L); C_{ads} es la concentración de adsorbente empleado (2–4 mg/L); pH corresponde al medio de adsorción (4–6); y t es el tiempo de contacto (45–75 min). Dado que el modelo es de naturaleza polinomial, las variables independientes se consideran continuas, lo que permite interpolar valores reales dentro del dominio experimental definido. Los valores de arsénico predichos por este modelo polinomial se presentan en el Apéndice A.

4. Conclusiones

Se obtuvo un polinomio con un coeficiente de determinación de 0.9983. Con base en el análisis residual realizado, se puede decir que el modelo polinomial con cuatro variables puede predecir correctamente el arsénico remanente dentro de los siguientes rangos:

pH de 4 a 6, tiempo de contacto de 45 a 75 min, concentración inicial de arsénico de 194 a 397 mg/L y concentración de adsorbente de 2 a 4 mg/L. Asimismo, se determinó que la concentración inicial de arsénico y el tiempo de contacto tienen un efecto significativo en el proceso de adsorción, pues cuanto mayor sea el tiempo de contacto, menor será la cantidad de arsénico remanente. En este sentido, se identificó como rango óptimo de operación un tiempo de contacto de 60 a 90 min y una concentración inicial de arsénico de 200 a 250 mg/L. Este trabajo sirve como herramienta para el diseño y la optimización de sistemas de tratamiento de agua, contribuyendo a la remoción eficiente del arsénico en condiciones controladas.

Contribución de los autores: Manejo de variables para análisis estadístico, metodología, validación, interpretación de resultados, investigación, escritura, visualización: Fernanda Guzmán Recino Conceptualización: Benoit Auguste Roger Fouconnier, Darío Colorado Garrido y Beatriz Adriana Escobedo Trujillo.

Financiamiento: La autora agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el otorgamiento de la beca de doctorado No. (579982).

Declaración del Comité de Ética: No aplicable.

Declaración de Disponibilidad de Datos: Las contribuciones originales de este estudio están incluidas en el artículo; cualquier consulta adicional puede dirigirse a los autores de correspondencia.

Conflictos de Interés: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Abreviaciones

MSR	Método de Superficie de Respuesta
As	Arsénico
t_{contacto}	Tiempo de contacto
C_{ads}	Concentración adsorbida
$C_{\text{As, inicial}}$	Concentración inicial de arsénico

Apéndice A

Tabla A. Datos utilizados para la obtención del modelo polinomial.

Corrida*	$C_{\text{As, inicial}}^*$ (mg/L)	C_{ads}^* (mg/L)	pH*	Tiempo* (min)	As remo- vido* (mg/L)	As remo- vido* (%)	As remanente* (experimental)	As remanente (predicho)
1	306	3	5	60	75	24.51	231	224.07
2	397	4	6	75	123	30.98	274	273.65
3	397	4	6	45	79	19.9	318	318.88
4	397	2	4	75	99	24.94	298	295.45
5	194	4	6	75	68	35.05	126	124.11
6	306	3	5	60	85	27.78	221	224.07
7	306	3	5	60	81	26.47	225	224.07
8	306	3	5	60	83	27.12	223	224.07
9	194	4	4	75	73	37.63	121	120.58

10	397	4	4	45	83	20.91	314	315.35
11	194	4	6	45	40	20.62	154	155.42
12	399	2	6	75	98	24.56	301	300.77
13	306	3	5	60	79	25.82	227	224.07
14	194	2	6	75	63	32.47	131	132.88
15	194	2	4	45	42	21.65	152	151.62
16	397	4	4	75	125	31.49	272	270.12
17	397	2	4	45	72	18.14	325	331.63
18	306	3	5	60	82	26.8	224	224.07
19	194	4	4	45	43	22.16	151	151.89
20	397	2	6	45	58	14.61	339	335.15
21	306	3	5	60	84	27.45	222	224.07
22	194	2	4	75	61	31.44	133	129.36
23	194	2	6	45	41	21.13	153	155.14
24	306	3	5	60	80	26.14	226	224.07
25	306	3	5	30	30	9.8	276	271.46
26	306	3	5	90	93	35.29	198	202.54
27	306	3	5	60	83	27.12	223	224.07
28	306	3	5	60	81	26.47	225	224.07

Las columnas marcadas con asterisco (*) corresponden a datos obtenidos de: Experimental dataset on adsorption of Arsenic from aqueous solution using Chitosan extracted from shrimp waste; optimization by response surface methodology with central composite design. Dehghani, M. H., Maroosi, M., & Heidarinejad, Z. (2018). *Data in Brief*, 20, 1415-1421. El As remanente (predicho) fue obtenido por el modelo propuesto en este trabajo.

Referencias

- [1] H. Choi, S.-K. Park, D.-S. Kim, and M. Kim, "Determination of 6 arsenic species present in seaweed by solvent extraction, clean-up, and LC-ICP/MS," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 20, no. 1, pp. 39–44, Feb. 2011, doi: 10.1007/s10068-011-0006-9.
- [2] K. C. M. Kwok, L. F. Koong, G. Chen, and G. McKay, "Mechanism of arsenic removal using chitosan and nanochitosan," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 416, pp. 1–10, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.jcis.2013.10.031.
- [3] C. Wang, H. Liu, Y. Zhang, C. Zou, and E. J. Anthony, "Review of arsenic behavior during coal combustion: Volatilization, transformation, emission and removal technologies," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 68, pp. 1–28, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.pecs.2018.04.001.
- [4] N. Horzum, M. M. Demir, M. Nairat, and T. Shahwan, "Chitosan fiber-supported zero-valent iron nanoparticles as a novel sorbent for sequestration of inorganic arsenic," *RSC Adv.*, vol. 3, no. 21, p. 7828, 2013, doi: 10.1039/c3ra23454a.
- [5] M. Moradi, M. Fazlzadehdavil, M. Pirsaeheb, Y. Mansouri, T. Khosravi, and K. Sharafi, "Response surface methodology (RSM) and its application for optimization of ammonium ions removal from aqueous solutions by pumice as a natural and low cost adsorbent," *Archives of Environmental Protection*, vol. 42, no. 2, pp. 33–43, Jun. 2016, doi: 10.1515/aep-2016-0018.

- [6] I. K. Basha, E. M. Abd El-Monaem, R. E. Khalifa, A. M. Omer, and A. S. Eltaweil, "Sulfonated graphene oxide impregnated cellulose acetate floated beads for adsorption of methylene blue dye: optimization using response surface methodology," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, p. 9339, Jun. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-13105-4.
- [7] M. O. Ani, M. C. Menkiti, and L. N. Emembolu, "Characterizations of a functionalized disused plastic-derived membrane and investigation of the effects of process variables on its adsorptive uptake of Pb²⁺ from simulated effluent using response surface methodology," *Waste Management Bulletin*, vol. 2, no. 2, pp. 66–82, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wmb.2024.03.005.
- [8] R. H. . Myers, D. C. . Montgomery, and C. M. . Anderson-Cook, *Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments*, 3rd ed. Wiley, 2009.
- [9] M. H. Dehghani, M. Maroosi, and Z. Heidarinejad, "Experimental dataset on adsorption of Arsenic from aqueous solution using Chitosan extracted from shrimp waste; optimization by response surface methodology with central composite design," *Data Brief*, vol. 20, pp. 1415–1421, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.09.003.
- [10] A. Weremfo, S. Abassah-Oppong, F. Adulley, K. Dabie, and S. Seidu-Larry, "Response surface methodology as a tool to optimize the extraction of bioactive compounds from plant sources," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 103, no. 1, pp. 26–36, Jan. 2023, doi: 10.1002/jsfa.12121.
- [11] Y. Yang *et al.*, "Adsorption property of fluoride in water by metal organic framework: Optimization of the process by response surface methodology technique," *Surfaces and Interfaces*, vol. 28, p. 101649, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.surfin.2021.101649.
- [12] J. Du, Y. Li, G. Jin, J. Wang, and L. Chen, "Determination and correlation of solubility of 2,4,6,8,10,12-Hexacyclopropyl-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane in 12 pure solvents at temperatures ranging from 278.15K to 318.15K," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 70, no. 10, pp. 4302–4314, Oct. 2025, doi: 10.1021/acs.jced.5c00434.
- [13] S. Imane *et al.*, "Utilization of maize pith powder as a cost-effective adsorbent for the removal and analysis of Crystal Violet from aqueous solutions before determination by UV-Vis spectrophotometry," *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 5–25, Jun. 2025, doi: 10.24200/amecj.v8.i02.1010.
- [14] S. H. Alrefaee *et al.*, "Adsorption and effective removal of organophosphorus pesticides from aqueous solution via novel metal-organic framework: Adsorption isotherms, kinetics, and optimization via Box-Behnken design," *J. Mol. Liq.*, vol. 384, p. 122206, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.122206.
- [15] N. P. Sibiya, G. Amo-Duodu, E. K. Tetteh, and S. Rathilal, "Model prediction of coagulation by magnetised rice starch for wastewater treatment using response surface methodology (RSM) with artificial neural network (ANN)," *Sci. Afr.*, vol. 17, p. e01282, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01282.