

## Estudios de cinética de adsorción de atrazina sobre una bentonita

### Kinetic studies of atrazine adsorption on bentonite

Natalia Castrillo <sup>1,2\*</sup>, Micaela Molina <sup>1,3</sup>, Sofia Gómez <sup>1,3</sup>, Adela Mercado <sup>1,3</sup>

(1) Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, Salta- Argentina

(2) Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Av. Bolivia 5150, Salta- Argentina

(3) Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Av. Bolivia 5150, Salta- Argentina

\*autor de correspondencia ([nataliacastrillo.salta@gmail.com](mailto:nataliacastrillo.salta@gmail.com))

Recibido 01/08/2025

Evaluado 19/11/2025

Aceptado 12/12/2025

<https://doi.org/10.65093/aci.v16.n4.2025.41>

#### RESUMEN

Muestras naturales y purificadas de una bentonita argentina (BG) fueron investigadas como materiales adsorbentes de atrazina. Los procesos de adsorción se analizaron mediante la aplicación de modelos cinéticos, con el propósito de predecir parámetros característicos y determinar las capacidades de adsorción. La calidad del ajuste de los modelos se evaluó a través del coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ). Los parámetros cinéticos obtenidos revelaron que la bentonita posee una elevada capacidad de adsorción de atrazina, la cual se incrementa tanto con la disminución de la temperatura como con el aumento de la fracción arcillosa. Este comportamiento confirma que la purificación del material mejora su desempeño, al incrementar la disponibilidad de sitios activos y reducir la interferencia de impurezas. En conjunto, estos resultados destacan el potencial de la bentonita BG y su fracción purificada como adsorbentes eficaces en procesos de remediación, ofreciendo una alternativa frente a la problemática asociada al uso de plaguicidas.

Palabras clave: atrazina, montmorillonita, adsorción, remediación ambiental

#### ABSTRACT

Natural and purified samples of an Argentine bentonite (BG) were investigated as adsorbent materials for atrazine. The adsorption processes were analyzed through the application of kinetic models, with the purpose of predicting characteristic parameters and determining adsorption capacities. The quality of the model fitting was evaluated using the linear correlation coefficient ( $R^2$ ). The kinetic parameters obtained revealed that bentonite exhibits a high adsorption capacity for atrazine, which increases both with decreasing temperature and with the higher content of the clay fraction. This behavior confirms that purification of the material enhances its performance by increasing the availability of active sites and reducing the interference of impurities. Overall, these results highlight the potential of BG bentonite and its purified fraction as effective adsorbents in remediation processes, offering a sustainable alternative to address the environmental issues associated with pesticide use.

Keywords: atrazine, montmorillonite, adsorption, environmental remediation

## INTRODUCCIÓN

La adsorción es un proceso mediante el cual la materia presente en una fase se concentra sobre la superficie de otra, generalmente sólida. Este fenómeno puede clasificarse en adsorción física (fisisorción) y adsorción química (quimisorción). En la fisisorción, las interacciones entre el adsorbato y la superficie del sólido son de tipo Van der Waals, involucrando energías relativamente bajas y permitiendo la formación de multicapas sin alterar la identidad de la molécula adsorbida. En cambio, la quimisorción implica la formación de enlaces químicos entre adsorbato y adsorbente, con energías más elevadas, y se limita a la formación de una monocapa, sobre la cual pueden depositarse capas adicionales mediante fisisorción (Agboola & Benson, 2021; Lv *et al.*, 2025).

El estudio de los procesos de adsorción ha adquirido gran relevancia en las últimas décadas, especialmente en el campo de la remediación ambiental, donde se busca mitigar la presencia de contaminantes persistentes en suelos y aguas. La elección del material adsorbente resulta crítica, ya que sus propiedades estructurales, texturales y químicas determinan la eficiencia del proceso (Wang *et al.*, 2024a). Entre los adsorbentes sólidos más utilizados se encuentran las bentonitas, arcillas ricas en esmectita del tipo montmorillonita, reconocidas por su elevada superficie específica, capacidad de intercambio catiónico y plasticidad. Estas características han permitido su aplicación en diversos procesos de adsorción (Yang *et al.*, 2025; Basiony *et al.*, 2020).

Numerosos trabajos han reportado la capacidad de las bentonitas para adsorber agua, y estudios cinéticos han demostrado que los datos experimentales se ajustan adecuadamente a modelos como el de pseudo segundo orden (Tran, 2023; Wang *et al.*, 2024b). Más allá de su uso tradicional como desecantes, las bentonitas han encontrado aplicaciones en múltiples sectores industriales, incluyendo la producción de catalizadores, la industria farmacéutica, la purificación de aceites y vinos, y la fabricación de materiales cerámicos (Wang *et al.*, 2024a; Basiony *et al.*, 2020). En el ámbito ambiental, su potencial como adsorbentes de contaminantes orgánicos e inorgánicos ha despertado creciente interés, posicionándolas como alternativas sostenibles frente a tecnologías más costosas o menos accesibles (Yang *et al.*, 2025).

En este contexto, la atrazina, uno de los herbicidas más empleados en la agricultura argentina, representa un contaminante prioritario debido a su persistencia, movilidad y capacidad de lixiviación hacia cuerpos de agua subterráneos y superficiales (Salomón *et al.*, 2025; Gagnetten *et al.*, 2023). La atrazina ha sido detectada en concentraciones significativas en suelos agrícolas y cursos de agua, generando preocupación por sus efectos tóxicos sobre organismos acuáticos y su potencial impacto en la salud humana (Gagnetten *et al.*, 2023). La evaluación de la cinética de adsorción de atrazina sobre bentonitas constituye una herramienta fundamental para comprender los mecanismos de interacción, estimar la eficiencia del proceso de remoción y proponer estrategias de mitigación adaptadas a las condiciones locales (Dutta & Singh, 2015).

El presente trabajo se centra en el estudio de la adsorción de atrazina sobre una bentonita argentina, en estado natural y purificada, con el fin de aportar evidencia sobre su potencial como material adsorbente en procesos de remediación ambiental. Los resultados obtenidos buscan contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles para la problemática de los plaguicidas en ecosistemas agrícolas, reforzando la importancia de las bentonitas como recursos naturales de bajo costo y amplia disponibilidad en la región.

## MATERIALES Y METODOS

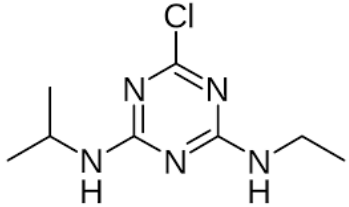
### Adsorbentes

Se evaluaron dos bentonitas argentinas: una muestra natural (BG) y su fracción purificada (BGp). Análisis químico, mineralogía y propiedades fisicoquímicas se estudiaron en trabajos previos (Castrillo *et al.*, 2018). Estas determinaciones confirmaron la presencia de esmectita como mineral arcilloso principal y la eliminación de impurezas como cuarzo y feldespato tras la purificación. Las características del adsorbente purificado son las siguientes: Fórmula estructural:  $(\text{Si}_{7,93} \text{Al}_{0,07})(\text{Al}_{2,90} \text{Fe}_{0,16} \text{Mg}_{0,82} \text{Mn}_{0,002} \text{Ti}_{0,02})(\text{Na}_{0,76} \text{Ca}_{0,17} \text{K}_{0,04})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ , Capacidad de intercambio catiónico (CIC): 160,7 meq/100 g; Superficie específica:  $97 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ .

## Herbicida

Se utilizó atrazina de grado analítico (Sigma-Aldrich, pureza  $\geq 98\%$ ) sin purificación adicional. El compuesto, cuyo nombre químico IUPAC es 2-cloro-4-(etilamino)-6-(isopropilamino)-s-triazina, se presenta como un sólido cristalino. Se preparó una solución madre en etanol absoluto (Merck, grado HPLC) y se realizaron diluciones acuosas para los ensayos. Sus principales propiedades fisicoquímicas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades químicas del 2-cloro- 4-etil amina- 6-isopropilamina- 1, 3, 5-triazina

Nombre genérico	Atrazina	Estructura química
Formula química	$C_8H_{14}ClN_5$	
Masa molar (g mol <sup>-1</sup> )	215,7	
pKa	1,62	
Punto de fusión (°C)	175	
Solubilidad en agua (mg L <sup>-1</sup> )	35	
$\lambda_{max}$ (nm)	220	

## Equipamiento y condiciones experimentales

La preparación de soluciones y suspensiones se efectuó con una balanza analítica Boeco BAS31 (precisión  $\pm 0,1$  mg). Los ensayos de adsorción se realizaron en sistema batch, utilizando tubos de polipropileno de 50 mL (Falcon), con agitación constante en un baño termostático WB-4MS (precisión  $\pm 0,1$  °C). La separación de fases se llevó a cabo en una centrífuga Sorvall ST16 (4000 rpm, 10 min).

La determinación de atrazina residual se realizó mediante un espectrofotómetro GBC-UV-Vis 918, registrando absorbancia a 220 nm con cubetas de cuarzo de 1 cm de paso óptico.

Las suspensiones se prepararon con una concentración de bentonita de 1000 mg L<sup>-1</sup> y soluciones de atrazina de 7,2; 14,4; 21,6 y 28,8 mg L<sup>-1</sup>. Los ensayos se realizaron a 25 °C y 40 °C, con tiempos de contacto de 1, 6, 12, 24 y 72 h. Cada serie experimental se efectuó por duplicado para garantizar reproducibilidad.

La cantidad de atrazina adsorbida en función del tiempo ( $q_t$ ) se calculó a partir de la ecuación (1)

$$q_t = \frac{(C_i - C_t) \times V}{m} \quad (1)$$

donde:

$q_t$ = cantidad de atrazina adsorbida en el tiempo (mg g<sup>-1</sup>)

$C_i$ = concentración inicial de atrazina en la solución (mg L<sup>-1</sup>)

$C_t$ = concentración de atrazina en la solución en el tiempo (mg L<sup>-1</sup>)

$V$ = volumen de la solución (L)

$m$ = masa del adsorbente (g)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El progreso de adsorción de atrazina en las muestras se estudió en función del tiempo de contacto a dos temperaturas (25 y 40 °C), con el objetivo de identificar la cinética del proceso. En la Figura 1 se presentan los resultados experimentales, expresados como la cantidad de atrazina adsorbida por unidad de masa de adsorbente,  $q$  (mg g<sup>-1</sup>), en función del tiempo (h).

Se observa que la atrazina es retenida siguiendo una tendencia logarítmica, con una marcada dependencia de la temperatura y de la naturaleza del material. En particular, la adsorción se ve favorecida a menor temperatura

y en las muestras purificadas, con mayor proporción de mineral arcilloso montmorillonita, lo cual coincide con lo reportado en estudios previos sobre la influencia de la fracción arcillosa en la eficiencia de adsorción de pesticidas (Salomón *et al.*, 2025). En todos los casos, el proceso se caracteriza por una alta velocidad inicial de adsorción, atribuible a la disponibilidad de un gran número de sitios activos en la superficie de las partículas. Posteriormente, la velocidad disminuye progresivamente hasta alcanzar el equilibrio, aproximadamente a las 24 horas, momento en el cual la cantidad adsorbida permanece prácticamente constante. Este comportamiento es típico de sistemas en los que la ocupación de los sitios activos ocurre rápidamente, seguida de una etapa de difusión más lenta hacia poros internos o sitios de menor accesibilidad (Agboola & Benson, 2021).

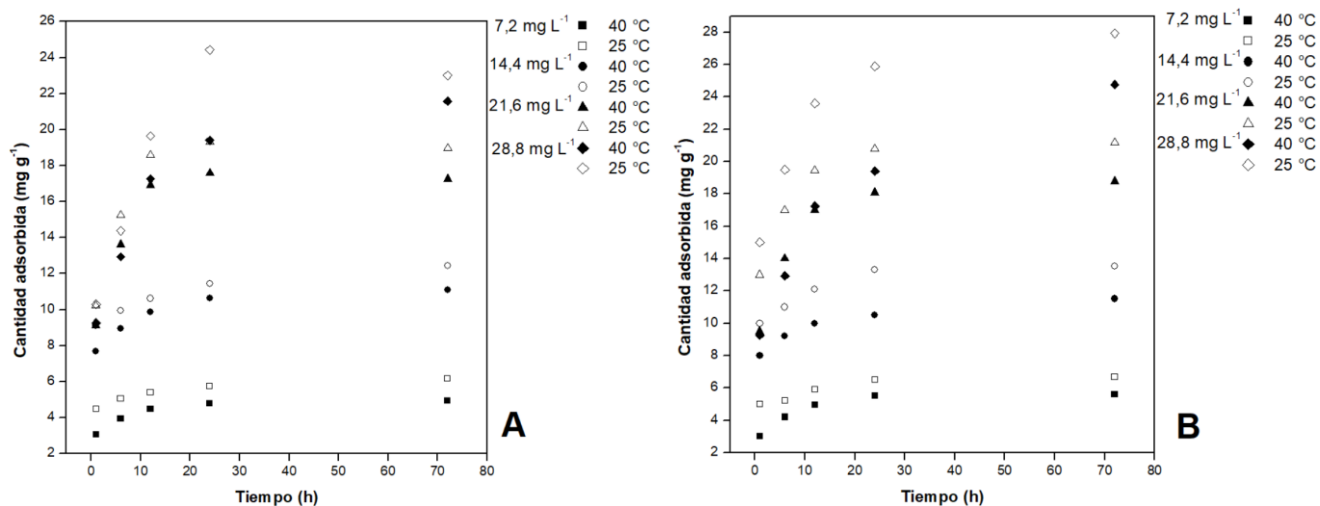


Fig. 1: Cinética de adsorción de atrazina a diferentes concentraciones iniciales (7.2, 14.4, 21.6 y 28.8 mg L<sup>-1</sup>) en función del tiempo de contacto. (A) Bentonita natural (BG). (B) Bentonita purificada (BGp).

En la Tabla 2 se muestran las capacidades de adsorción de atrazina obtenidas para las distintas concentraciones iniciales (7.2, 14.4, 21.6 y 28.8 mg L<sup>-1</sup>) y temperaturas estudiadas.

Tabla 2: Capacidades de adsorción de atrazina determinadas a 25 °C y 40 °C, comparando el desempeño de los adsorbentes en estudio.

Adsorbente	Temperatura (°C)	Concentración inicial (mg L <sup>-1</sup> )	Atrazina adsorbida (mg g <sup>-1</sup> )
BG	25	7.2	6.2
		14.4	12.4
		21.6	19.3
		28.8	23.0
BG	40	7.2	4.9
		14.4	11.1
		21.6	17.6
		28.8	21.6
BGp	25	7.2	6.7
		14.4	13.5
		21.6	21.2
		28.8	27.9
BGp	40	7.2	5.6
		14.4	11.5
		21.6	18.8
		28.8	24.8

Los resultados evidencian una disminución en la capacidad de adsorción con el incremento de la temperatura, lo que sugiere que el proceso es exotérmico, en concordancia con lo señalado por otros autores en sistemas similares (Yang *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024b). En este tipo de sistemas, la fijación de atrazina sobre la superficie de la bentonita libera energía, y el aumento de la temperatura favorece la desorción, reduciendo la cantidad total de atrazina retenida.

Asimismo, se destaca que la bentonita purificada (BGp) exhibió una mayor capacidad de adsorción que la bentonita natural (BG). Este incremento puede atribuirse al mayor contenido de fase arcillosa alcanzado tras el tratamiento de purificación, el cual elimina impurezas minerales y orgánicas que compiten por los sitios activos de adsorción. En consecuencia, la BGp presenta una superficie más homogénea y con mayor disponibilidad de sitios específicos para la interacción con las moléculas de atrazina (Basiony *et al.*, 2020).

### Identificación del Modelo Cinético

Para analizar la cinética de adsorción se procedió al ajuste de los datos experimentales a los modelos de Elovich y de Pseudo segundo orden, comúnmente utilizados para describir procesos de adsorción sobre sólidos adsorbentes (Lv *et al.*, 2025).

#### Modelo Cinético de Elovich

La ecuación que define este modelo es:

$$q_t = \alpha + 2.303 \beta \log t \quad (2)$$

donde  $\alpha$  ( $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) es la velocidad inicial de adsorción y está relacionado con la energía de quimiadsorción, y  $\beta$  ( $\text{mg g}^{-1}$ ) está relacionada con la superficie cubierta y la energía de activación por quimisorción.

En la Figura 2 se evidencia que el modelo de Elovich no mostró un buen ajuste a los datos experimentales, lo que se confirma con los bajos coeficientes de correlación obtenidos (ver Tabla 3).

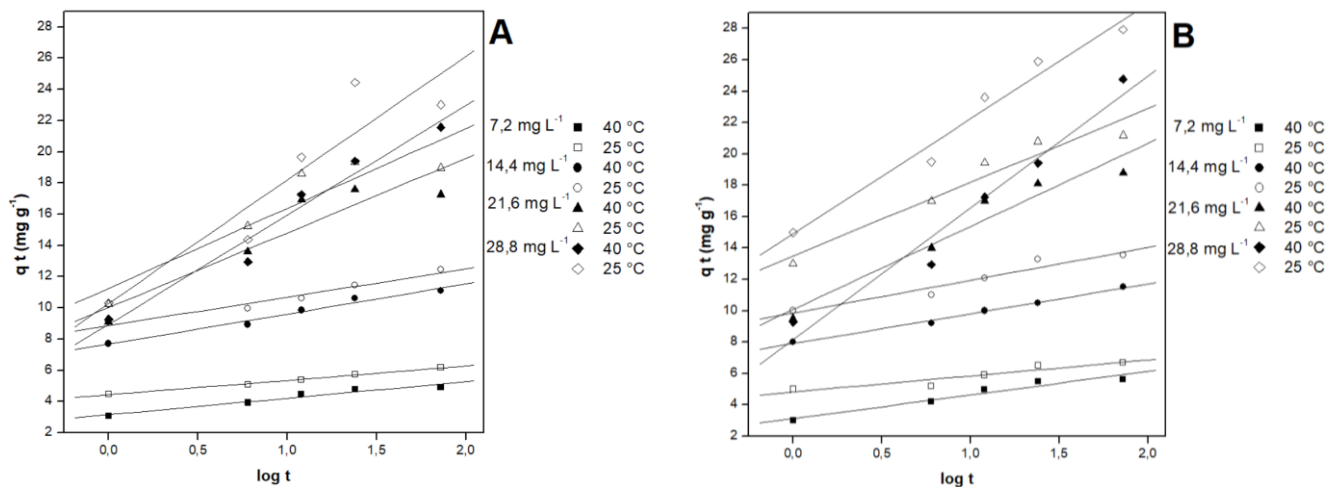


Fig. 2: Ajuste de los resultados experimentales al modelo cinético de Elovich. (A) Bentonita natural (BG). (B) Bentonita purificada (BGp)

#### Modelo Cinético de Pseudo-Segundo Orden

Describe procesos de quimisorción. Supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos del material adsorbente. En este caso, el modelo es descrito por la ecuación (3):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

donde  $k_2$  es la constante cinética de pseudo segundo orden ( $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) y  $q_e$  es la cantidad adsorbida en el equilibrio. Otras investigaciones realizadas con bentonitas han reportado un buen ajuste a este modelo de los datos experimentales (Mekhamer, 2016; Tran *et al.*, 2023).

Tal como se observa en la Figura 3 y como lo ratifican los valores de coeficientes de correlación de la Tabla 3, este modelo es el que mejor ajusta los datos experimentales.

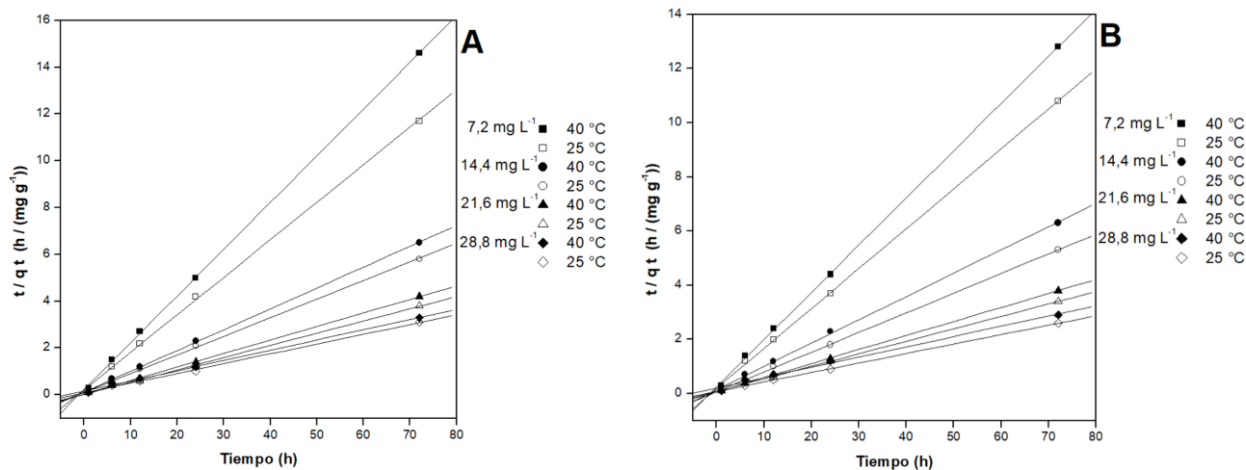


Fig. 3: Ajuste de los resultados experimentales al modelo cinético de Pseudo-Segundo Orden. (A) Bentonita natural (BG). (B) Bentonita purificada (BGp)

Este ajuste respalda la hipótesis de que la atrazina se fija en sitios activos específicos de la superficie del material adsorbente, describiendo un proceso característico de quimisorción. En consecuencia, los datos sugieren la participación de diversas interacciones químicas que explican la elevada capacidad de retención observada. Entre las más relevantes se destacan: (i) puentes de hidrógeno, establecidos entre los grupos amino de la atrazina y los grupos hidroxilo y/o silanoles presentes en la superficie de la arcilla; (ii) interacciones electrostáticas con los cationes intercambiables ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) localizados en las interláminas; (iii) coordinación directa de los átomos de nitrógeno de la atrazina con dichos cationes; (iv) fuerzas de Van der Waals y posibles interacciones  $\pi$ - $\pi$  entre los anillos aromáticos de la atrazina y la superficie de la bentonita (Ahmad *et al.*, 2022). La combinación de estos mecanismos ofrece una explicación sólida y coherente del buen ajuste observado al modelo cinético de pseudo segundo orden, reforzando la interpretación de que la adsorción de atrazina sobre bentonita no se limita a procesos físicos, sino que involucra de manera significativa interacciones químicas específicas. Este comportamiento también sustenta la mayor afinidad registrada en la bentonita purificada BGp, donde la eliminación de impurezas competitivas durante el tratamiento incrementa la disponibilidad y accesibilidad de los sitios activos, favoreciendo una retención más eficiente de la atrazina.

La tendencia exotérmica del proceso, evidenciada por la disminución de la capacidad de adsorción con el aumento de la temperatura, es consistente con la literatura sobre la adsorción de atrazina y otros herbicidas en materiales arcillosos (Salomón *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024b). Este comportamiento se interpreta como la liberación de energía durante la fijación de la atrazina en los sitios activos, lo que favorece la desorción a temperaturas más elevadas.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan el potencial de la bentonita argentina BG, especialmente en su forma purificada, como un adsorbente eficaz y sostenible para la remoción de atrazina en sistemas acuosos. La concordancia con estudios previos y la identificación de interacciones químicas específicas aportan evidencia sólida para considerar a la bentonita como un recurso natural de bajo costo y alta disponibilidad en estrategias de remediación ambiental.

Tabla 3: Parámetros cinéticos característicos y coeficientes de correlación ( $R^2$ ) obtenidos para los modelos propuestos de adsorción de atrazina

Modelo de Elovich									
Adsorbente	Ci (mg L <sup>-1</sup> )	40 °C				25 °C			
		$\alpha$	pendiente	B	R <sup>2</sup>	$\alpha$	pendiente	B	R <sup>2</sup>
BG	7,2	3,161	1,056	0,459	0,956	4,441	0,916	0,398	0,991
	14,4	7,677	1,930	0,838	0,975	8,868	1,816	0,789	0,960
	21,6	10,017	4,791	2,081	0,855	11,250	5,127	2,226	0,855
	28,8	8,940	7,017	3,047	0,964	10,273	7,934	3,445	0,863
BGp	7,2	3,113	1,513	0,657	0,947	4,821	1,019	0,442	0,878
	14,4	7,902	1,906	0,828	0,993	9,857	2,091	0,908	0,933
	21,6	10,068	5,309	2,305	0,938	13,492	4,702	2,042	0,938
	28,8	8,166	8,405	3,649	0,962	14,894	7,354	3,193	0,972

Modelo de pseudo segundo orden											
Adsorbente	Ci (mg L <sup>-1</sup> )	40 °C					25 °C				
		pendiente	q <sub>e</sub>	ord. al orig	k <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	pendiente	q <sub>e</sub>	ord. al orig	k <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
BG	7,2	0,200	5,010	0,242	0,165	0,9998	0,160	6,254	0,220	0,116	0,9994
	14,4	0,089	11,261	0,111	0,071	0,9997	0,079	12,658	0,127	0,049	0,9991
	21,6	0,057	17,513	0,047	0,070	0,9994	0,052	19,231	0,039	0,069	0,9995
	28,8	0,045	22,422	0,143	0,014	0,9984	0,042	23,810	0,082	0,022	0,9965
BGp	7,2	0,174	5,737	0,265	0,115	0,9996	0,147	6,807	0,188	0,115	0,9995
	14,4	0,085	11,710	0,138	0,053	0,9991	0,073	13,736	0,077	0,069	0,9997
	21,6	0,052	19,194	0,081	0,033	0,9998	0,047	21,505	0,050	0,043	0,9998
	28,8	0,038	26,178	0,204	0,007	0,9926	0,035	28,653	0,075	0,016	0,9993

### Comparación con otros adsorbentes

Diversos materiales han sido estudiados para la remoción de atrazina en sistemas acuosos, incluyendo carbones activados, zeolitas, materiales poliméricos y arcillas modificadas. Los carbones activados, por ejemplo, presentan una elevada superficie específica y gran capacidad de adsorción, pero su preparación y regeneración suelen implicar costos elevados y procesos energéticamente intensivos (Ahmad *et al.*, 2022). Las zeolitas, aunque poseen estructuras microporosas bien definidas, muestran menor afinidad por moléculas orgánicas como la atrazina, limitando su eficiencia en comparación con las bentonitas (Wang *et al.*, 2024a). Por su parte, los materiales poliméricos y resinas de intercambio iónico ofrecen selectividad, pero su disponibilidad y precio restringen su aplicación a gran escala.

En contraste, la bentonita argentina estudiada (BG y BGp) constituye un recurso natural de bajo costo y amplia disponibilidad, con propiedades texturales y químicas que favorecen la adsorción de atrazina. La purificación incrementa la fracción esmectítica y la accesibilidad de sitios activos, mejorando su desempeño frente a la bentonita natural. No obstante, una limitación inherente a las bentonitas es su heterogeneidad superficial, que puede dar lugar a variaciones en la capacidad de adsorción según el origen geológico y el grado de purificación. Además, el carácter exotérmico del proceso implica que la eficiencia disminuye a temperaturas más elevadas, lo que debe considerarse en aplicaciones prácticas.

La comparación muestra que, aunque existen adsorbentes con mayor capacidad en ciertas condiciones, la bentonita purificada es una alternativa sostenible y económica, especialmente en regiones donde la disponibilidad y el bajo costo de materiales locales son clave para la remediación ambiental.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la aptitud de las bentonitas estudiadas como materiales adsorbentes de atrazina, evidenciando una estrecha relación entre la capacidad de adsorción y el contenido de fracción arcillosa incrementado mediante el proceso de purificación. La bentonita purificada (BGp) mostró un desempeño superior, atribuible a la mayor disponibilidad de sitios activos tras la eliminación de impurezas competitivas.

La disminución de la capacidad de adsorción con el aumento de la temperatura pone de manifiesto el carácter exotérmico del proceso, en el cual la fijación de atrazina libera energía y la desorción se ve favorecida a temperaturas más elevadas.

El ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de pseudo-segundo orden respalda la interpretación de que la adsorción de atrazina involucra principalmente procesos de quimisorción, asociados a interacciones químicas específicas entre el adsorbato y los sitios activos de la bentonita. No obstante, la heterogeneidad de la superficie sugiere la coexistencia de contribuciones de adsorción física, lo que permite considerar el proceso como una combinación de mecanismos físicos y químicos dependientes de la naturaleza de los sitios de adsorción presentes en la arcilla.

En comparación con otros adsorbentes comúnmente utilizados, como carbones activados, zeolitas o resinas poliméricas, la bentonita argentina se posiciona como una alternativa sostenible y económicamente viable, gracias a su bajo costo, amplia disponibilidad y buen desempeño en la remoción de atrazina. No obstante, debe reconocerse que su eficiencia puede verse afectada por la heterogeneidad superficial y por la disminución de la capacidad de adsorción a temperaturas más elevadas, aspectos que representan limitaciones a considerar en aplicaciones prácticas.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan el potencial de las bentonitas argentinas, especialmente en su forma purificada, como adsorbentes de bajo costo y alta disponibilidad para la remoción de atrazina en sistemas acuosos, aportando evidencia sólida para su aplicación en estrategias de remediación ambiental adaptadas a contextos locales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a las instituciones a las que pertenecen y, en particular, al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA), por el apoyo financiero otorgado a través de los proyectos de investigación N° 2737 y N° 2953. Este respaldo resultó esencial para la ejecución de la presente investigación y contribuyó de manera significativa al desarrollo del trabajo y a la consolidación de los resultados alcanzados.

## REFERENCIAS

- Agboola, O.D. & Benson, N.U. (2021). Physisorption and chemisorption mechanisms influencing micro (nano) plastics-organic chemical contaminants interactions: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 678574. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678574>
- Ahmad, M., Riaz, U., Iqbal, S., Ahmad, J., Rasheed, H., Al-Farraj, A.S., *et al.* (2022). Adsorptive removal of atrazine from contaminated water using low-cost carbonaceous materials: A review. *Frontiers in Materials*, 9, 909534. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.909534>
- Basiony, M.S., Gaber, S.E., Ibrahim, H. & Elshehy, E.A. (2020). Synthesis and characterization of Al-pillared bentonite for remediation of chlorinated pesticide-contaminated water. *Clays and Clay Minerals*, 68 (3), 197-210. <https://doi.org/10.1007/s42860-020-00072-y>
- Castrillo, N., Mercado, A. & Volzone, C. (2018). Solid desiccants from natural and modified bentonites. *Cerâmica*, 64 (372), 526-537. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643722447>

- Dutta, A. & Singh, N. (2015). Surfactant-modified bentonite clays: preparation, characterization, and atrazine removal. *Environmental science and pollution research*, 22 (5), 3876-3885. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3656-3>
- Gagneten, A.M., Regaldo, L., Carriquiriborde, P., Reno, U., Kergaravat, S.V., Butinof, M., *et al.* (2023). Atrazine characterization: an update on uses, monitoring, effects, and environmental impact, for the development of regulatory policies in Argentina. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19 (3), 684-697. <https://doi.org/10.1002/ieam.4690>
- Lv, W., Zhang, R., Sun, F., Guo, Y., Jiao, W., Wang, H., *et al.* (2025). Application of Physical Adsorption and Chemisorption Techniques in Heterogeneous Catalytic Research: A Review. *Kinetics and Catalysis*, 1-26. <https://doi.org/10.1134/S0023158424602596>
- Mekhamer, W.K. (2016). Energy storage through adsorption and desorption of water vapour in raw Saudi bentonite. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S264-S268. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.03.021>
- Salomón, Y.L., Georgin, J., Allasia, D.G.P., Netto, M.S., Aniagor, C.O., Ighalo, J.O., *et al.* (2025). A Comprehensive Review on Atrazine Adsorption: From Environmental Contamination to Efficient Removal Technologies. *Sustainability*, 17 (23), 10455. <https://doi.org/10.3390/su172310455>
- Tran, H.N. (2023). Applying linear forms of pseudo-second-order kinetic model for feasibly identifying errors in the initial periods of time-dependent adsorption datasets. *Water*, 15 (6), 1231. <https://doi.org/10.3390/w15061231>
- Wang, P., Shen, X., Qiu, S., Zhang, L., Ma, Y. & Liang, J. (2024a). Clay-based materials for heavy metals adsorption: Mechanisms, advancements, and future prospects in environmental remediation. *Crystals*, 14 (12), 1046. <https://doi.org/10.3390/cryst14121046>
- Wang, H., Zhao, L., & Hou, W. (2024b). Pseudo-second-order kinetic equation for describing the effect of sorbent and sorbate concentrations. *Langmuir*, 40 (7), 3559-3568. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.3c03235>
- Yang, X., Li, Y., Gan, M., Chen, Y., Meng, H., Li, L., *et al.* (2025). Adsorption and desorption effect of modified bentonite on soil heavy metal Pb/Cd and the feasibility assessment of reducing the ecotoxicity. *Environmental Sciences Europe*, 37 (1), 105. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01144-3>

