

Bioadsorción de iones plata por quitosano extraído del exoesqueleto *Penaeus vannamei* (langostino)

Bioadsorption of silver ions by chitosan extracted from the *Penaeus vannamei* (shrimp) exoskeleton

John Jáuregui-Nongrados¹ <https://orcid.org/0000-0002-7252-2591>

Miguel Mucha Torre¹ <https://orcid.org/0000-0003-3449-2210>

María Bendezú² <https://orcid.org/0000-0002-3053-3057>

Jorge García² <https://orcid.org/0000-0001-9880-7344>

Haydee Chávez² <https://orcid.org/0000-0002-8717-4307>

Mario Bolarte-Arteaga³ <https://orcid.org/0000-0001-9939-8917>

Mario Pineda-Pérez⁴ <https://orcid.org/0000-0001-6818-7797>

Berta Loja Herrera¹ <https://orcid.org/0000-0001-6560-0486>

Angel T. Alvarado^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8694-8924>

¹Universidad San Ignacio de Loyola. Lima. Perú.

²Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica. Perú.

³Universidad Continental. Lima. Perú.

⁴Universidad Científica del Sur. Lima. Perú.

*Autor para la correspondencia: tianshi.alvarado@hotmail.com

RESUMEN

Introducción: A medida que aumenta el uso de la plata en la nanotecnología biomédica e industrial es mayor la posibilidad de encontrar estos iones metálicos en las aguas residuales, los que contaminan el medio ambiente biótico, generan disfunciones orgánicas en moluscos, muerte de aves y enfermedades en la población.

Objetivo: Evaluar la cinética de bioadsorción de iones plata en agua simulada de efluentes industriales por quitosano extraído del exoesqueleto *Penaeus vannamei* (langostino) para contribuir a solucionar problemas medioambientales y de salud pública del Perú.

Métodos: Se realizó un estudio experimental y prospectivo. Se cuantificó iones plata (Ag^+) de una solución acuosa mediante el método de espectrometría de absorción atómica por llama, a una longitud de onda de 328,1 nm.

Resultados: Se observó un 99,1 % y 97,92 % de bioadsorción a pH 4 y pH 8, respectivamente; menor en medios más ácidos ($\text{pH} \leq 2$). El modelo cinético de pseudosegundo orden fue el óptimo con un valor de $R^2 = 1$, en los tres tamaños de partículas del quitosano; velocidad de bioadsorción (h) del quitosano a un tamaño de 0,25-0,18 mm fue de $38,911 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ y su K_2 $0,063 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. En el equilibrio la bioadsorción se mantiene constante a 10, 20 y 30 °C, y su K_2 en ese intervalo fue de 0,026 a $0,043 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$.

Conclusiones: La cinética de bioadsorción del quitosano es de pseudosegundo orden, con una alta capacidad de retención de iones plata (Ag^+) a pH de 4-8, a 30 °C y con un tamaño de partícula de 0,15-0,25 mm.

Palabras clave: quitosano; cinética de bioadsorción; iones plata; *Penaeus* sp.

ABSTRACT

Introduction: As the use of silver in biomedical and industrial nanotechnology increases, the possibility of finding these metal ions in wastewater increases, which pollute the biotic environment, generate organic dysfunctions in molluscs, death of birds and diseases in the population.

Objective: To evaluate the kinetics of bioadsorption of silver ions in simulated water of industrial effluents by chitosan extracted from the *Penaeus* sp. (shrimp) exoskeleton to contribute to solving environmental and public health problems in Peru.

Methods: An experimental and prospective study was conducted. Silver ions (Ag^+) of an aqueous solution were quantified using the flame atomic absorption spectrometry method, at a wavelength of 328.1 nm.

Results: 99.1 % and 97.92 % of bioadsorption were observed at pH 4 and pH 8, respectively; it was lower in more acidic media ($\text{pH} \leq 2$). The pseudo-second order kinetic model was optimal with a value of $R^2 = 1$ in the three sizes of chitosan particles; bioadsorption rate (h) of chitosan at a size of 0.25-0.18 mm was $38.911 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ and its K_2 $0.063 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. At equilibrium the bioadsorption remains constant at 10, 20 and 30 °C, and its K_2 in that range was 0.026 to $0.043 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$.

Conclusions: The bioadsorption kinetics of chitosan is pseudo-second order, with a high retention capacity of silver ions (Ag^+) at pH of 4-8, at 30 °C and with a particle size of 0.15-0.25 mm.

Keywords: chitosan; bioadsorption kinetics; silver ions; *Penaeus sp.*

Recibido: 28/04/2022

Aceptado: 28/08/2022

Introducción

Las nanopartículas metálicas con diámetro menor al tamaño de una célula humana tiene aplicación en la bionanotecnología, especialmente los iones plata (Ag^+) están siendo utilizados como transportadores de fármaco, como fármacos (actividad antiviral, antimicrobiana, anticancerígena, y antiinflamatoria), diagnóstico, implantes o dispositivos anticonceptivos^(1,2,3) y en equipos de protección personal frente al virus SARS-CoV-2.⁽⁴⁾ En la síntesis de la plata nanotecnológica se utilizan productos químicos (hidracina, etilenglicol, N-dimetilformamida, y otros),⁽⁵⁾ adicionalmente, en los efluentes de estas industrias se emiten iones plata y residuos de forma inadecuada, lo que es potencialmente perjudicial para el medio ambiente biótico (causante de la disrupción endocrina en diversos organismos),⁽⁶⁾ y para la salud humana (disfunción hepática, renal y sanguínea)⁽⁷⁾

Se ha propuesto diversas técnicas para recuperar plata procedente de efluentes industriales, como el intercambio de iones, electrólisis, separación por membranas y adsorción.⁽⁸⁾ El método de adsorción se utiliza mucho por su eficiencia, su fácil manejo y bajo costo económico,⁽⁹⁾ tal como la cáscara de arroz que elimina iones plomo (Pb^{++}) y arsénico (As^{+3} , Ar^{+5}) de soluciones acuosas,⁽¹⁰⁾ Mientras que la resina de tanino de testa de nuez de cajú adsorbe iones cadmio (Cd^{++}), iones cobre (Cu^+ , Cu^{++}) e iones Pb^{++} .⁽¹¹⁾ Sin embargo, la baja capacidad de adsorción de estos adsorbentes hacia la plata limitan sus aplicaciones en la práctica biotecnológica e industrial.

En los últimos años se ha estudiado al quitosano que es un polisacárido lineal constituido por dos unidades estructurales, poli [β -(1,4) 2-desoxi-

2-amino-D-glucopiranososa] (D-glucosamina) y poli[β -(1,4)-2-desoxi-2-acetamido-D-glucopiranososa] (N-acetil-D-glucosamina). Ese polisacárido biodegradable se obtiene por desacetilación termoalcalina de la quitina, que separa al grupo acetilo y se expresan los grupos amino (-NH₂) e hidroxilo (-OH), los cuales tienen la capacidad de generar quelatos con los iones metálicos presentes en soluciones acuosas.^(12,13,14)

En la figura 1 se muestra la estructura química del quitosano y el sitio de enlace por quelación.

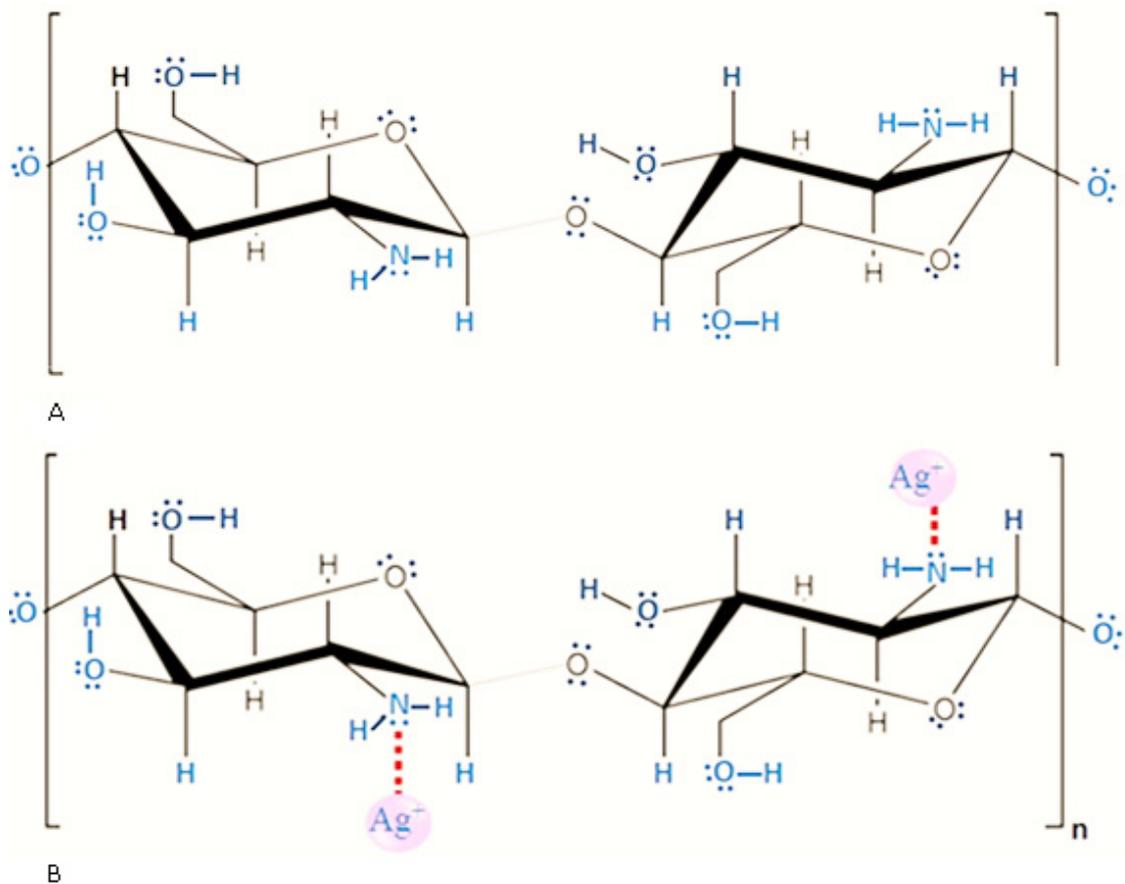


Figura realizada por los autores.

Fig. 1 - Estructura química y mecanismo de bioadsorción del quitosano. (A) muestra la estructura química del quitosano y (B) el sitio de enlace por quelación.

La quitina es el segundo biopolímero renovable más abundante después de la celulosa que se encuentra en el exoesqueleto de diversos crustáceos como los langostinos (*Penaeus vannamei*) y cangrejos (*Carcinus maenas*), que se obtienen a bajo costo a partir de los residuos de la industria alimentaria.⁽¹⁵⁾ La capacidad de bioadsorción del quitosano

depende de los grupos aminos reactivos, por lo que el grado de desacetilación (DD) y el tamaño de las partículas, son los factores de mayor importancia.^(16,17)

Luego de realizar una revisión en la base de datos PubMed ScienceDirect sobre la literatura científica de bioadsorción de metales con el polisacárido quitosano en el Perú, se evidenció que los estudios de este método son todavía escasos. Adicionalmente, en los últimos años se viene proponiendo metabolitos secundarios de plantas y de otros productos naturales como el quitosano, extraído del exoesqueleto del langostino, para minimizar la concentración de iones plata y otros metales potencialmente tóxicos que amenazan la vida de especies acuáticas y humanas.

Por tanto, el objetivo fue evaluar la cinética de bioadsorción de iones plata en agua simulada de efluentes industriales por quitosano extraído del exoesqueleto *Penaeus vannamei* (langostino) para contribuir a solucionar problemas medioambientales y de salud pública del Perú.

Métodos

Se realizó un estudio experimental y prospectivo desde enero 2020 a febrero 2022. Los iones de plata (Ag^+) en la solución acuosa se cuantificaron mediante el método de espectrometría de absorción atómica de llama (FAAS) a una longitud de onda de 328,1 nm. Se empleó un equipo Perkin-Elmer modelo 2500, equipado con una lámpara de cátodo hueco de plata, con una llama de aire y acetileno.

Se utilizó quitosano como bioadsorbente con un grado de desacetilización de 76,4 %, y con tamaño de partícula con mallas de 20-40, 40-60 y 60-80 según la serie Tyler.

Todos los reactivos fueron de grado analítico y calidad ACS (American Chemical Society) adquiridos de Mercantil Laboratorio SAC, Lima-Perú: ácido sulfúrico (H_2SO_4), hidróxido de sodio (NaOH) y nitrato de plata (AgNO_3); los que se conservaron en condiciones de laboratorio analítico (temperatura 20°C; humedad 40 %).

Como parte de la prueba del pH en la adsorción de los iones plata sin quitosano, se pesó una cantidad suficiente de nitrato de plata (AgNO_3) para cada uno de los 7 matraces marcados, y se obtuvo soluciones acuosas de iones plata a una concentración de 50 ppm

en ausencia del quitosano. Luego, se adicionó gotas de soluciones de hidróxido de sodio o ácido sulfúrico, según el caso, para obtener soluciones a pH 2, 4; 6; 8; 8,75; 9 y 10; con un tiempo de contacto de 120 min, y a temperatura de 20 °C. Posteriormente, se atomizó una muestra acuosa de iones Ag^+ con llama de aire/acetileno para formar átomos neutros que se detectan a una longitud de onda de 328,1 nm por el equipo de espectrofotometría de absorción atómica por llama (FAAS) [Perkin-Elmer modelo 2500].

El ensayo se determinó por lotes, disolviendo 100 mg del bioadsorbente de malla 40-60 (0,42-0,25 mm) en 50 mL de la solución acuosa del ion metálico, con agitación constante, a una temperatura de 20 ± 1 °C y durante 2 h, para garantizar condiciones de equilibrio a cada uno de los pH del estudio (pH 2, 4, 6 y 8). Posteriormente, las muestras se filtraron y almacenaron en viales recubiertos con papel de aluminio para evitar la fotooxidación, y se expusieron a las condiciones de la espectrometría de absorción atómica por llama (FAAS). En la figura 2 se resume la metodología del estudio:

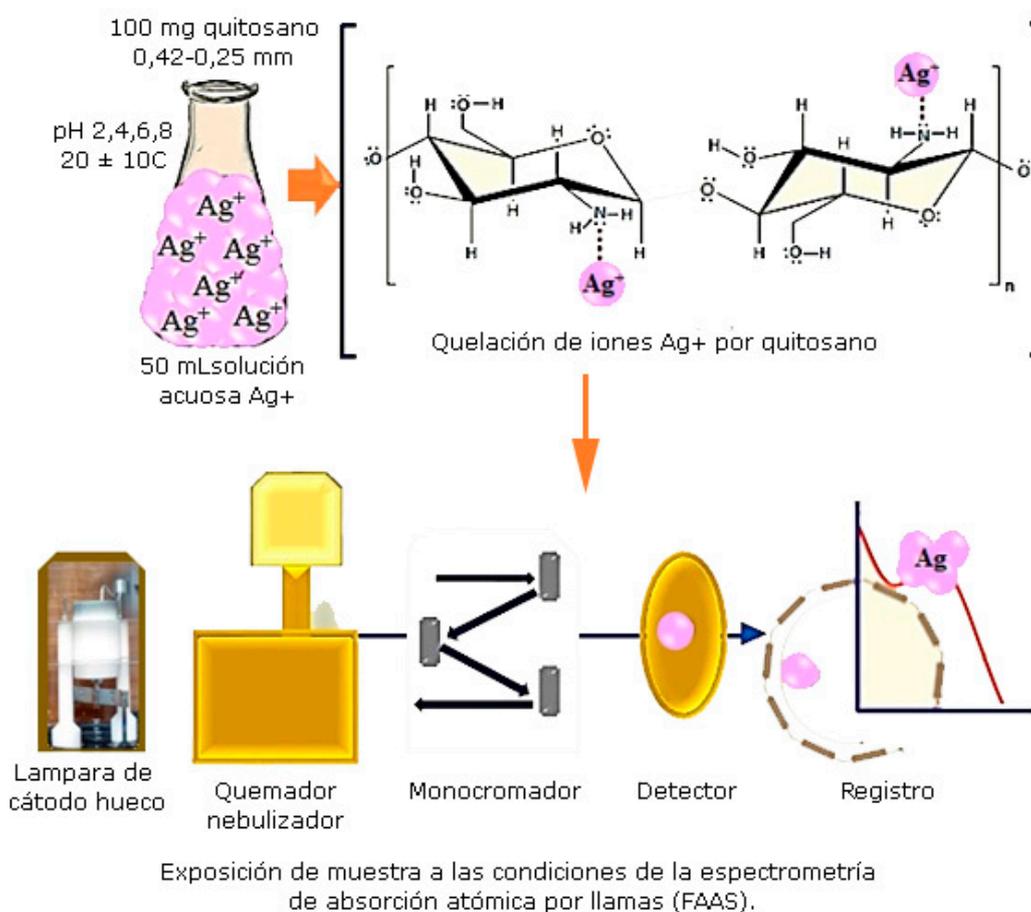


Fig. 2- Proceso metodológico de la cuantificación de Ag^+ a partir del quitosano.

Mediante la siguiente ecuación se calculó el porcentaje de Ag^+ retenido (A%):

$$A(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde: C_i , concentración inicial de la solución; C_f , concentración final de la solución.

Efecto de la granulometría en la bioadsorción

Se pesó 0,5 g del bioadsorbente natural de tamaño 20-40, luego se pesó la misma cantidad para los otros tamaños de quitosano (40-60 y 60-80), incorporándolos en tres matraces aforados de 250 mL marcados como A, B y C. Luego se adicionó a cada matraz, una cantidad suficiente de solución acuosa de iones plata de concentración 50 ppm y pH 4 hasta completar un volumen de 250 mL (2 mg/mL de quitosano). Las muestras se agitaron por espacio de 360 minutos a temperatura de laboratorio, luego se estudiaron a 10 °C, 20 °C y 30 °C. Durante ese lapso se tomaron muestras de 5 mL en los tiempos preestablecidos de 10, 20, 40, 60, 120, 180, 240 y 360 min, para determinar la cantidad de metal retenido en la superficie del bioadsorbente. La cantidad de metal retenido por el bioadsorbente ($q = \text{mg/g}$) se calculó mediante la ecuación 2:

$$q = \frac{(C_i - C_{eq})}{m} V \quad (2)$$

Donde: C_i es la concentración inicial de iones metálicos en solución, C_{eq} es la concentración de los iones metálicos en la solución después de alcanzado el equilibrio en la reacción de acomplejamiento, V es el volumen de la solución empleado y m es la masa del bioadsorbente utilizado.

Efecto de la temperatura en la bioadsorción

Para determinar el efecto de la temperatura en la cantidad de metal retenido por el bioadsorbente ($q = \text{mg/g}$) a los tiempos preestablecidos se evaluó una solución de Ag^+ que contenía bioadsorbente de malla 40-60, las cuales se estudiaron a temperaturas de 10

°C, 20 °C y 30 °C, y en los tiempos preestablecidos de 10, 20, 40, 60, 120, 180, 240 y 360 min.

Se aplicó el modelo cinético de pseudo primer y el pseudo segundo orden para determinar la cinética de bioadsorción de Ag^+ .⁽¹⁸⁾ Mediante la ecuación 3:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

Donde: q_e y q_t (mg/g) son las capacidades de adsorción en el equilibrio y en el tiempo t , respectivamente; k_1 es la constante de velocidad de pseudo primer orden en min^{-1} .

Dicha expresión se integra entre las condiciones límites $t = 0, q_t = 0$ y $t = t, q_t = q_t$, se obtiene la ecuación 4 de pseudo primer orden:

$$\log\left(\frac{q_e - q_t}{q_e}\right) = -\frac{k_1}{2,303}t \quad (4)$$

La cinética de pseudo segundo orden es una forma modificada de la ecuación de segundo orden que puede ser obtenida a partir de la ecuación 5:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{s2}(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

Donde: k_2 es la constante velocidad de pseudo segundo orden en $\text{g/mg} \cdot \text{min}$.

Cuando se integra esta expresión entre las condiciones límites $t = 0, q_t = 0$ y $t = t, q_t = q_t$, se obtiene la ecuación 6:

$$\left(\frac{t}{q_t}\right) = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e}t \quad (6)$$

Donde: $h = k_2 \cdot q_e^2$ es la velocidad de adsorción inicial.

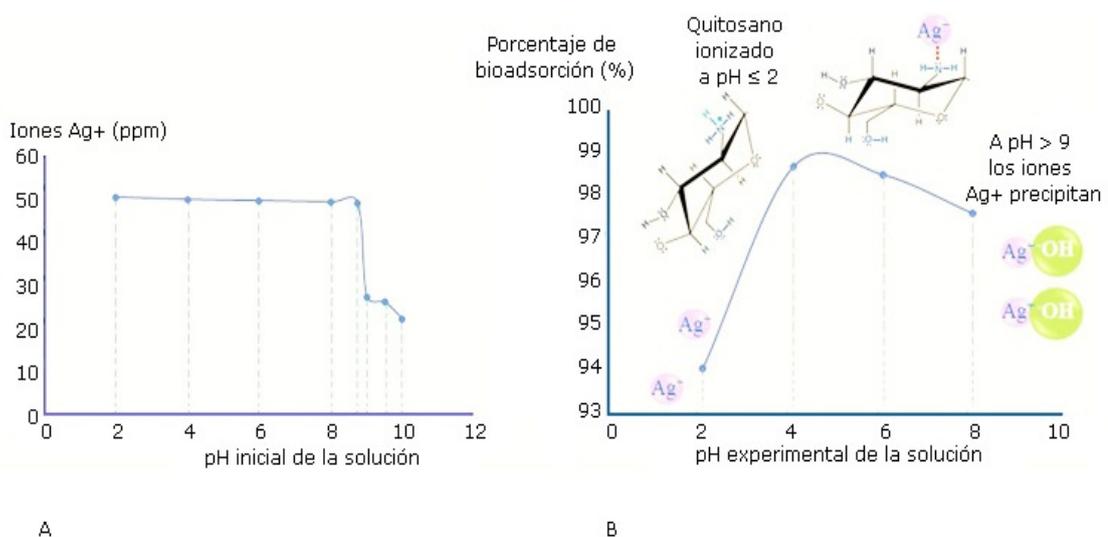
El incremento de la constante de velocidad de pseudo segundo orden en función de la temperatura se determinó con la ecuación 7 de Arrhenius:

$$\ln k = \ln A_o - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

Donde: A_0 es la constante de Arrhenius, independiente de la temperatura; E_a es la energía de activación, kJ/mol; R es la constante universal de los gases, 8,314 J/mol.K; T es la temperatura en °K.

Resultados

En la figura 3A se observó concentraciones superiores a 49 ppm de iones plata (Ag^+) a pH que va de 2 a 8, la cual se determinó en ausencia del quitosano en una solución acuosa que simula agua de efluentes industriales con una concentración de 50 ppm del mencionado ion. En la figura 3B se muestra los porcentajes de bioadsorción del quitosano, que se realizó después de conocer los pH óptimos para la adsorción de los iones Ag^+ ; siendo la bioadsorción óptima en un pH que oscila entre 4 a 8. En la figura 3C se evidencia que la cantidad de Ag^+ bioadsorbida es elevada en los primeros 40 minutos de contacto, principalmente a una granulometría de 0,25-0,18 mm de diámetro del quitosano. En la figura 3D se observa la bioadsorción del quitosano a diferentes temperaturas (10 °C, 20 °C y 30 °C), la que corresponde al modelo de pseudo segundo orden.



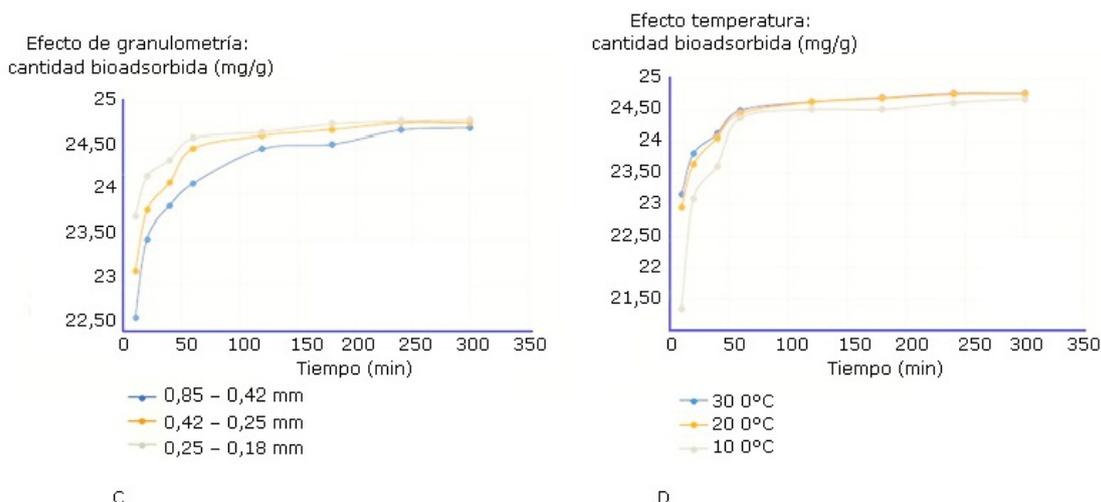


Fig. 3- Porcentaje de bioadsorción de iones Ag^+ en solución acuosa en ausencia de quitosano y a diferentes pH (A), capacidad de bioadsorción del quitosano de acuerdo al pH (B), granulometría (C) y temperatura (D).

En la tabla 1 se representan los valores de los parámetros cinéticos del pseudo primer orden y pseudo segundo orden. Se observa que el modelo de pseudo segundo orden reproduce con mayor eficiencia los resultados experimentales con un valor de $R^2 = 1$, en todos los casos.

Tabla 1 - Parámetros cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden

Malla*	Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden			
	K_1 (min^{-1})	R^2	q_e (mg/g)	h ($mg \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	K_2 ($g \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)	R^2
20-40	0,018	0,82	24,814	17,992	0,029	1
40-60	0,018	0,83	24,876	21,834	0,035	1
60-80	0,016	0,83	24,876	38,911	0,063	1

* malla 20-40 = 0,85 -0,42 mm; malla 40-60 = 0,42-0,25 mm; malla 60-80 = 0,25-0,18 mm.

En la tabla 2 se observa que la velocidad de bioadsorción (h) se incrementa al aumentar la temperatura, y la capacidad de adsorción en el equilibrio se mantiene constante dentro del rango de 10-30 °C. Así, las constantes de velocidad k_2 varían entre 0,026 a 0,043 g/mg. min en el intervalo de temperaturas estudiadas.

Tabla 2 - Parámetros cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden a tres temperaturas

T (°C)	Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden			
	K ₁ (min ⁻¹)	R ²	q _e (mg/g)	h (mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	K ₂ (g·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	R ²
10	0,016	0,770	24,814	15,924	0,026	1
20	0,019	0,830	24,876	21,834	0,035	1
30	0,018	0,820	24,876	26,667	0,043	1

Discusión

Se evaluaron los factores que influyen en la cinética de bioadsorción del quitosano extraído de la quitina del langostino. Se sabe que el pH es un factor determinante del proceso cinético de bioadsorción, en tal sentido, primero se evaluó el rango de pH de la solución de iones Ag⁺ por 120 minutos (temperatura de 20 °C). Se encontró concentraciones mayores a 49 ppm de Ag⁺ en un rango de pH de 2 a 8. Luego, se estudió la capacidad de bioadsorción del quitosano, se observó porcentajes de 99,1 %, 98,9 % y 97,92 %, a pH 4, pH 6 y pH 8, respectivamente. Esto es posible debido a los grupos funcionales (principalmente grupos aminos -NH₂) que generan quelatos con los iones Ag⁺, pero a pH < 2 pueden competir con protones del medio ácido (H⁺), lo que favorece la formación de cationes (-⁺NH₃) que no pueden formar quelatos con los iones metálicos pesados.

A pH > 9 el porcentaje de bioadsorción disminuye por la formación de hidróxido de plata (AgOH) que precipita. Este resultado es relevante, ya que permite corroborar que todos los análisis para detectar y mitigar la cantidad de iones de plata en medios acuosos se deben realizar en el rango de pH encontrado. En el caso contrario se produciría un efecto combinado entre la bioadsorción de la plata por el quitosano y su precipitación. Los resultados están sustentados en la revisión realizada por *Benettayeb* y otros⁽¹⁹⁾, quienes indican que los grupos funcionales responsables de bioadsorción son -COOH, -CO-, -NH₂, -OH y -SH; lo que reveló que el quitosano tiene la capacidad de formar quelatos y eliminar iones metálicos pesados como As⁺³, As⁺⁵, Cd⁺⁺ y mercurio (Hg⁺⁺), por sus grupos aminos (-NH₂), a más de 1 mmol de contaminante por cada g de quitosano (1 mmol/g) a pH controlado.

Recientemente, *Abu* y otros⁽²⁰⁾ han modificado la estructura del quitosano con grupos carboxílicos para adsorber iones Cu^+ , Cu^{++} y zinc (Zn^{++}), con lo que se analiza su eficacia mediante análisis térmicos (calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría), espectroscopías (FT-IR, XRD), análisis elemental y microscopía electrónica de barrido; lo que es prometedor para tratar aguas residuales.

El tamaño granulométrico del quitosano es otro factor a considerar en la bioadsorción, en el presente estudio, se observó que a menor tamaño la capacidad de bioadsorción es mayor, esto debido a que existe mayor superficie de contacto del bioadsorbente natural, siendo su capacidad de adsorción máxima (q_e) a los 40 minutos y es constante a las tres temperaturas del estudio. Sin embargo, mientras más pequeño es el adsorbente puede afectar la transferencia intraparticular disminuyendo la adsorción, por ello, es importante determinar un tamaño óptimo que favorezca la cinética de bioadsorción.

El estudio de *Sreekumar y Col*⁽²¹⁾ encontraron que el grado de acetilación del quitosano influye en la granulometría y está en la cinética de bioadsorción; para ello, controlaron la formación de partículas y el diámetro hidrodinámico promedio de las partículas formadas que varían desde nano hasta micrómetros.

Se encontró que el modelo cinético del estudio es de pseudo segundo orden, y las capacidades máximas de bioadsorción de las tres muestras de quitosano (q_e) son similares para los tres tamaños de partícula, por lo que la velocidad del proceso de bioadsorción inicial (h) máximo es de 38,911 mg/g. min para el quitosano con un tamaño de 0,25-0,18 mm, lo que indica que ese es el tamaño de partícula adecuada para el proceso de bioadsorción, y se confirma por la constante cinética (k_2).

Los resultados son similares al reportado por *Upadhyay y Col*⁽²²⁾, quienes demostraron que el proceso de bioadsorción del quitosano se realiza mediante el modelo cinético de pseudo segundo orden. El valor de la energía de activación (E_a) que se obtuvo en el estudio fue de 18,02 kJ/mol, la misma se calculó con la ecuación 7. En un estudio previo que realizó *Zhang y Col*⁽⁸⁾ se menciona que los valores de E_a para procesos de bioadsorción con predominio de la interacción física es de 5-20 kJ/mol, en tal sentido, el valor encontrado en este estudio se encuentra dentro del rango mencionado. Respecto al impacto que tienen los iones plata en la Salud Pública, en un estudio realizado por *Wang y Col*⁽⁶⁾ se ha descrito que los iones plata en nanopartículas (AgNP) tienen la capacidad de alterar el desarrollo de las glándulas mamarias de los ratones (disminución

de colágeno fibroso alrededor del epitelio) y disminución de los niveles séricos de estradiol, lo cual podría suceder en los humanos.

Coutiño⁽²³⁾ reportó que estos iones se unen a la albúmina del plasma, son inductores de especies reactivas que generan estrés oxidativo y disfunción mitocondrial. *Guo y Col*⁽²⁴⁾ han informado que las nanopartículas de plata tienen efecto dual sobre la autofagia (mecanismo natural que degrada componentes disfuncionales). Primero, inducen la autofagia lo cual es un mecanismo de defensa celular contra la nanotoxicidad, pero también, puede ser un mecanismo potencial de nanotoxicidad por acumulación excesiva de iones metálicos.

Los resultados de esta investigación deben ser considerados en el contexto de varias limitaciones. Primero, el estudio se realizó en muestras experimentales de laboratorio, por lo que se sugiere seguir estudiando en muestras de aguas de ríos y en zonas de extracción de plata. En segundo lugar, la capacidad adsorbente del quitosano no se ha comparado con otros biopolímeros para proporcionar una real eficiencia del quelante.

Sin perjuicio con lo mencionado anteriormente, los resultados contribuyen a generar mayor evidencia científica sobre el uso alternativo del quitosano por ser biodegradable y bioadsorbente de iones de metales pesados y colorantes de aguas residuales,⁽²⁵⁾ lo que permitirá aplicar este bioadsorbente para reducir la contaminación del medio ambiente, evitar las disfunciones endocrinas de moluscos y muerte de las aves propias del país; a la vez mitigar las enfermedades con componentes de estrés oxidativo que son un problema de salud pública peruana. Adicionalmente, al procesar la quitina de los crustáceos se reduce los desechos y su impacto negativo en el medio ambiente; y el producto obtenido natural (quitosano) sería de bajo costo económico en los países con economía emergente.

Se concluye que la cinética de bioadsorción del quitosano es de pseudo segundo orden y debido a su estructura molecular tiene una excelente capacidad de retención de iones plata (Ag^+) a pH comprendidos entre 4 y 8. A una temperatura de 30 °C y con un tamaño de partícula de 0,15-0,25 mm, lo que favorece la velocidad de bioadsorción, y se logra alcanzar el equilibrio a los 120 min.

Referencias bibliográficas

1. Oliver AL, Oliver A. La nanotecnología, la arquitectura y el arte. *Mundo nano*. 2017;10(19):117-28. DOI: 10.22201/ceiich.24485691e.2017.19.57719.
2. Basova T, Vikulova E, Dorovskikh S, Hassan A, Morozova N. The use of noble metal coatings and nanoparticles for the modification of medical implant materials. *Materials & Design*. 2021;204:109672. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109672.
3. Soto-Vazquez R, Záyago E, Maldonado LA. Gobernanza de la nanomedicina: una revisión sistemática. *Mundo nano*. 2022;15(28):1e-25e. DOI: 10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69682.
4. Sportelli M, Izzi M, Kukushkina E, Hossain S, Picca RA, Ditaranto N, *et al*. Can Nanotechnology and Materials Science Help the Fight against SARS-CoV-2? *Nanomaterials (Basel)*. 2020;10(4):802. DOI: 10.3390/nano10040802.
5. Lee SH, Jun BH. Silver Nanoparticles: Synthesis and Application for Nanomedicine. *Int J Mol Sci*. 2019;20(4):865. DOI: 10.3390/ijms20040865.
6. Wang Z, Li Q, Xu L, Ma J, Wei B, An Z, *et al*. Silver nanoparticles compromise the development of mouse pubertal mammary glands through disrupting internal estrogen signaling. *Nanotoxicology*. 2020;14(6):740-56. DOI: 10.1080/17435390.2020.1755470.
7. Kumar D, Niraula P, Aryal H, Budhathoki N, Phuyal S, Marahatha R, *et al*. Plant Mediated Green Synthesis of Ag NPs and Their Possible Applications: A Critical Review. *Journal of Nanotechnology*. 2022;2022:1-24. DOI: 10.1155/2022/2779237.
8. Zhang B, Wang S, Fu L, Zhao J, Zhang L, Peng J. Selective Adsorption of Silver Ions from Highly Acidic Aqueous Solutions by Polymers Containing Multiple Sulfur Groups. *Water Air Soil Pollut*. 2018;229 (6):199. DOI: 10.1007/s11270-018-3849-3.
9. Zhou Y, Gao B, Zimmerman AR, Cao X. Biochar-supported zerovalent iron reclaims silver from aqueous solution to form antimicrobial nanocomposite. *Chemosphere*. 2014;117:801-805. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.057.
10. Babazad Z, Kaveh F, Ebadi M, Zafar R, Habibi M. Efficient removal of lead and arsenic using macromolecule-carbonized rice husks. *Heliyon*. 2021;7:e06631. DOI: 10.1016/j.heliyon. 2021.e06631.
11. Nnaji NJ, Okafor NI, Ekwonu AM, Osuji OU, Okwukogu OO, Okoye O, *et al*. Cashew nut testa tannin resin-preparation, characterization and adsorption studies.

- Journal of Taibah University for Science. 2021;15(1):170-83. DOI: 10.1080/16583655.2021.1930717.
12. Kanmani P, Aravind J, Kamaraj M, Sureshbabu P, Karthikeyan S. Environmental applications of chitosan and cellulosic biopolymers: A comprehensive outlook. *Bioresour. Technol.* 2017;242:295-303. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.119.
13. Desbrières J, Guibal E. Chitosan for wastewater treatment. *Polym. Int.* 2018;67(1):7-14. DOI: 10.1002/pi.5464.
14. Sarode S, Upadhyay P, Khosa M, Mak T, Shakir A, Song S, *et al.* Overview of wastewater treatment methods with special focus on biopolymer chitin-chitosan. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019;121:1086-00. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.089.
15. Jiang Y, Fu C, Wu S, Liu G, Guo J, Su Z. Determination of the Deacetylation Degree of Chitooligosaccharides. *Marine drugs.* 2017;15(11):332. DOI: 10.3390/md15110332.
16. Weißpflog, Gündel JA, Vehlow D, Steinbach C, Müller M, Boldt R, *et al.* Solubility and Selectivity Effects of the Anion on the Adsorption of Different Heavy Metal Ions onto Chitosan. *Molecules.* 2020;25:2482. DOI:10.3390/molecules25112482.
17. Curbelo C, Palacio Y, Fanego S. Desacetilación de quitina obtenida por vía química de exoesqueletos de camarón *Litopenaeus vannamei*. *Cen. az.* 2021 [acceso 21/04/2022];48(3):53-61. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-53.pdf>
18. Pascu B, Ardean C, Davidescu CM, Negrea A, Ciopec M, Duțeanu N, *et al.* Modified Chitosan for Silver Recovery-Kinetics, Thermodynamic, and Equilibrium Studies. *Materials.* 2020;13(3):657. DOI: 10.3390/ma13030657.
19. Benettayeb A, Ghosh S, Usman M, Seihoub FZ, Sohoo I, Chia CH, *et al.* Some well-known alginate and chitosan modifications Used in adsorption: a review. *Water.* 2022;14:1353. DOI: 10.3390/w14091353.
20. Abu El-Soad AM, Lazzara G, Abd El-Magied MO, Cavallaro G, Al-Otaibi JS, Sayyed MI, *et al.* Chitosan Functionalized with Carboxyl Groups as a Recyclable Biomaterial for the Adsorption of Cu (II) and Zn (II) Ions in Aqueous Media. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;23:2396. DOI: 10.3390/ijms23042396.
21. Sreekumar S, Goycoolea FM, Moerschbacher BM, Rivera-Rodriguez GR. Parameters influencing the size of chitosan-TPP nano- and microparticles. *Sci Rep.* 2018;8:4695. DOI: 10.1038/s41598-018-23064-4.

22. Upadhyay U, Sreedhar I, Singh SA, Patel CM, Anitha KL, Recent advances in heavy metal removal by chitosan based adsorbents. *Carbohydrate Polymers*. 2021;251:117000. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117000.
23. Coutiño EM. Plata Coloidal: Xenobiótico, Antígeno y Disruptor Hormonal. *Rev. educ. bioquím.* 2015 [acceso: 24/02/2022];34(1):10-25. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/reb/v34n1/1665-1995-reb-34-01-00010.pdf>
24. Guo L, He N, Zhao Y, Liu T, Deng Y. Autophagy Modulated by Inorganic Nanomaterials. *Theranostics*. 2020;10(7):3206-3222. DOI: 10.7150/thno.40414.
25. Murcia-Salvador A, Pellicer JA, Fortea MI, Gómez-López VM, Rodríguez-López MI, Núñez-Delicado E, *et al.* Adsorption of Direct Blue 78 Using Chitosan and Cyclodextrins as Adsorbents. *Polymers*. 2019;11(6):1003. DOI: 10.3390/polym11061003.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: John Jáuregui-Nongrados, Miguel Mucha Torre, María Bendezú, Jorge García, Haydee Chávez, Mario Bolarte-Arteaga, Mario Pineda-Pérez, Berta Loja Herrera, Angel Tito Alvarado.

Investigación: John Jáuregui-Nongrados, Miguel Mucha Torre, María Bendezú, Jorge García, Haydee Chávez, Mario Bolarte-Arteaga, Mario Pineda-Pérez, Berta Loja Herrera, Angel Tito Alvarado.

Análisis formal: María Bendezú, Jorge García, Haydee Chávez, Mario Bolarte-Arteaga.

Metodología: John Jáuregui-Nongrados, Jorge García, Haydee Chávez.

Administración de proyecto: John Jáuregui-Nongrados, Berta Loja Herrera.

Supervisión: John Jáuregui-Nongrados, Miguel Mucha Torre.

Redacción - borrador original: Angel Tito Alvarado, Jorge García, Haydee Chávez.

Redacción - revisión y edición: John Jáuregui-Nongrados, Miguel Mucha Torre, María Bendezú, Jorge García, Haydee Chávez, Mario Bolarte-Arteaga, Mario Pineda-Pérez, Berta Loja Herrera, Angel Tito Alvarado.