

Silver Reduction by Biopolymerization of Rio Grande Waters

Roberto Chuquilin – Cueva¹; Yuler Espirilla – Salazar²; Gladys S. Licapa - Redolfo³; Gary Christiam Farfán Chilicaus⁴; Aldo Roger Castillo Chung⁵; Rolando Licapa – Redolfo⁶

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00020678@upn.pe; N00022798@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe;

^{4,5}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gfarfanc@unitru.edu.pe; alrocas@unitru.edu.pe

⁶Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú, dinner.licapa@unsch.edu.pe

Abstract– The research design was carried out with the objective of determining the influence of residence time and pH on the reduction of silver by the biopolymerization of water from the Rio Grande. The study was developed with the realization of silver contents subjected to different residence times (40, 80, 120 minutes) and different pH values (2, 4, 6), assuming an initial silver concentration of 14.01 ppm. The study concluded its result with a reduction of silver (initial concentration: 14.01 ppm) at 40 minutes and 2 pH was 49.2% (7.12 ppm of Ag) and as the residence time and pH increase, the reduction of silver increased, obtaining a reduction of 96.3 % (0.52 ppm of Ag) with a parameter of 80 min and pH of 4. The results are verified by an analysis of variance of 95%.

Key word– Silver, chitosan, heavy metals, biosorption.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Reducción de Plata por Biopolimerización de Aguas de Río Grande

Roberto Chuquilin – Cueva¹; Yuler Espirilla – Salazar²; Gladys S. Licapa - Redolfo³, Gary Christiam Farfán Chilicaus⁴; Aldo Roger Castillo Chung⁵; Rolando Licapa – Redolfo⁶

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00020678@upn.pe; N00022798@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe;

^{4,5}Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gfarfanc@unitru.edu.pe; alrocas@unitru.edu.pe

⁶Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Perú, dinner.licapa@unsch.edu.pe

Resumen– El diseño de investigación se realizó con el objetivo de determinar la influencia del tiempo de residencia y pH en la reducción de plata por la biopolimerización de aguas provenientes del río grande. El estudio se desarrolló con la realización de contenidos de plata sometidas a distintos tiempos de residencia (40, 80, 120 minutos) y diferentes valores de pH (2, 4, 6), asumiendo una concentración inicial de plata inicial de 14.01 ppm. El estudio concluyó su resultado con una reducción de plata (concentración inicial: 14.01 ppm) a 40 minutos y 2 de pH fue de 49.2 % (7.12 ppm de Ag) y a medida que aumenta el tiempo de residencia y el pH, la reducción de plata aumentaba, obteniendo una reducción de 96.3 % (0.52 ppm de Ag) con un parámetro de 80 minutos y pH de 4. Los resultados son comprobados por un análisis de varianza de 95%.

Palabras claves– Plata, quitosano, metales pesados, biosorción.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la electrólisis además de la refinación de metales preciosos, es considerado una técnica opcional para la recuperación de la plata, provenientes de soluciones industriales (limpias diluidas y concentradas). Siendo así, la industria hidrometalúrgica antes de realizar el proceso requiere de su el alcance de la reacción catódica, puesto que, todavía no existe la tecnología adecuada para realizar la recuperación selectiva de la plata en soluciones con bajos valores de plata en presencia de concentraciones altas de cobre [1].

Asimismo, la contaminación del agua por metales pesados es un problema en estudio por décadas, debido al aumento indiscriminado en las actividades antropogénicas que ha desequilibrado al medio ambiente afectando la salud humana [2]. Su presencia en el medio ambiente como se señaló anteriormente, corresponde en gran medida a las actividades mineras e industriales, aguas residuales y efluentes domésticos [3].

Como se mencionó anteriormente, la contaminación del agua por la liberación de iones de metales pesados al medio ambiente es un problema de preocupación mundial; Una de las principales fuentes de metales pesados son los desechos de la industria química moderna, como: la fabricación de enchapados

y baterías, obtención de fertilizantes, la minería, fabricación de papel, síntesis de pesticidas, utilización de combustibles fósiles y la fabricación de plásticos, entre otros [4].

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido límites aceptables para estos contaminantes en el agua potable, como se muestra en la tabla 1 [5].

TABLA 1.
LÍMITES PERMISIBLES DE METALES PESADOS EN AGUA POTABLE.

Contaminante	EPA (mg/L)	OMS (mg/L)
Pb (II)	0,015	0,01
Cr (III)	0,1	0,05
Cd (II)	0,005	0,003
As (IV)	0,010	0,01
Hg (II)	0,002	0,006
Cu (II)	1,3	2
Zn (II)	5	3

Se utilizan varios métodos para combatir los iones de metales pesados en el agua. La elección de una determinada técnica depende de varios factores, entre los que destacan la concentración del contaminante y el coste del proceso. En la tabla 2, se muestran las técnicas convencionales de remoción de metales pesados las cuales incluyen: oxidación-reducción, biorremediación, ósmosis inversa, tratamiento electroquímico, coagulación, ablandamiento con cal, precipitación, filtración por membrana, intercambio iónico y adsorción [5].

TABLA 2.
FUENTES DE CONTAMINACIÓN Y TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE ALGUNOS METALES PESADOS

Metal	Fuentes de Contaminación	Técnicas de tratamiento
Plomo.	Pinturas. Pesticidas. Emisiones de automóviles. Minería.	Ósmosis inversa. Intercambio iónico. Cementación. Precipitación química. Adsorción.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Arsénico.	Pesticidas. Fungicidas. Agua geotérmica y desgaste de piedras volcánicas.	Coagulación. Intercambio iónico. Alúmina activada. Micro o ultrafiltración. Adsorción.
Mercurio.	Depósitos minerales. Pesticidas. Baterías. Industria del papel.	Filtración con membrana. Biorremediación. Intercambio iónico. Precipitación. Adsorción.

De estos métodos, la adsorción es el más versátil y el más utilizado para eliminar metales pesados del agua. Las ventajas son muchas, como operación simple, bajo costo, buena tolerancia al pH y capacidad de procesamiento industrial. Además, tiene una alta eficiencia y selectividad que se logra mediante la funcionalización del material. Esta característica es deseable en el tratamiento de aguas industriales [6].

Industrialmente, la precipitación química es la más utilizada por su relativa facilidad para operarse. Aparte de ser económica y selectiva en cuanto a su proceso, sin embargo, a nivel de mantenimiento resulta muy costosa debido a la alta generación de lodo. Las precipitaciones químicas más utilizadas son por hidróxidos, bajo costo, bajo control del pH y eliminación por floculación y sedimentación, también se emplea los sulfuros por presentar solubilidades bajas. Esta técnica es la más efectiva en la eliminación de iones metálicos como Cu (II), Cd (II), Mn (II) y Zn (II) [7].

Por otro lado, en la síntesis por precipitación el tamaño de los cristales formados, dependerá de la presión, el PH, la temperatura y el tiempo de cristalización [8].

No obstante, los disolventes son sustancias químicas utilizadas en diversas actividades industriales, puesto que, es indispensable para la producción en diversos productos, como los fármacos, polímeros. Plásticos y plaguicidas entre otros [9].

El tratamiento para eliminar iones disueltos en agua mediante la reactivación de resinas de intercambio iónico con regenerantes se basa en el principio del intercambio iónico. Dado que es una reacción reversible y el material de intercambio se puede regenerar para nuevos procesos [10].

En particular, la adsorción ha demostrado ser una técnica eficaz para el tratamiento del agua, para la eliminación de contaminantes de bajo nivel y, en general, ofrece ventajas en términos de simplicidad, rentabilidad y producción mínima de lodos [11].

Algunos investigadores consideran que la biosorción es una subclase de adsorción, donde el sorbente es un tipo de matriz biológica llamada biosorbente [12]. En estos trabajos, se pueden encontrar en varias bases de datos en los últimos años, nos permiten considerar la biosorción como un método de

tratamiento prometedor para la eliminación de metales pesados en soluciones acuosas utilizando materiales biológicos naturalmente disponibles. La eliminación se logra debido a la interacción entre los iones metálicos y los grupos funcionales en la superficie del biomaterial [13].

La quitina es un biopolímero muy abundante en la naturaleza, solo superado por la celulosa, y puede obtenerse del exoesqueleto de crustáceos como los caparzones de los camarones mediante desproteínización y desmineralización. El quitosano es el principal derivado de la quitina obtenido por desacetilación de la quitina. Estos biopolímeros se han utilizado como coagulantes-floculantes en el tratamiento de aguas, procesamiento de tintes, productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos. Los grupos funcionales únicos de la quitina y el quitosano son los grupos acetamida y amino, respectivamente, que están presentes en diferentes proporciones según el grado de acetilación del biopolímero. Su estructura también contiene grupos hidroxilo, tres grupos funcionales con pares de electrones que pueden participar en el proceso de adsorción de metales pesados como Cd^{2+} y Pb^{2+} , que son contaminantes que se encuentran en las aguas residuales debido a actividades antrópicas o medios naturales [14].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación y Recolección de las Muestras

El material de estudio estuvo constituido por las muestras de aguas provenientes del río Grande (Mashcon) ubicado en el norte del Perú en la región Cajamarca, provincia de Cajamarca y forma parte de la vertiente del Atlántico con un caudal promedio anual estimado de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Limita por el norte con la cuenca del río Llaucano, por el sur con la cuenca del río Chusgon, por el sureste con la subcuenca del río San Miguelino, y por el suroeste con la subcuenca del río Chonta, así como muestra la figura 1 y la tabla 4.

Se tiene como población todo el río Grande, obteniendo una muestra de 50 litros de agua de los cuales se extrae 5 litros para los diferentes tratamientos de biopolimerización. A continuación, en las tablas 3 y 4 se muestran la concentración de la ley plata en la muestra sin tratamiento y los puntos de muestreo, respectivamente.

TABLA 3. LEY DE PLATA EN EL MATERIAL DE ESTUDIO

Propiedad	Concentración (ppm)
Ley inicial de plata	14.01

**TABLA 4
PUNTOS DE MUESTREO GEORREFERENCIADO**

Parámetro	Punto de Muestreo	Ubicaciones Coordenadas
Concentración de Plata, mg/L	PM	18°22'48" N 65°49'51" O



Fig. 1. Imagen satelital del recorrido del Río Grande y su vinculación con la actividad minera, y la ciudad de Cajamarca.

B. Diseño de Investigación

El tipo de investigación según el propósito, es aplicada y de acuerdo al diseño de investigación, es experimental.

C. Caracterización de la muestra

Se aplicó el protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) [15], teniendo en cuenta los parámetros de campo como temperatura y pH así como indica la figura 2.



Fig. 2. (a) Recojo y codificación de muestras (Río Grande) (b) Medida de parámetros de campo y toma de muestra (Medidor Multiparámetro, recipientes de 1 litro para las muestras y muestreador de botellas Van Dorn)

D. Procedimiento Experimental

Se sometió la biomasa en diversos procesos de lavado, reducción de tamaño y secado para caracterizar el material bioabsorbente como se muestra en la figura 3.

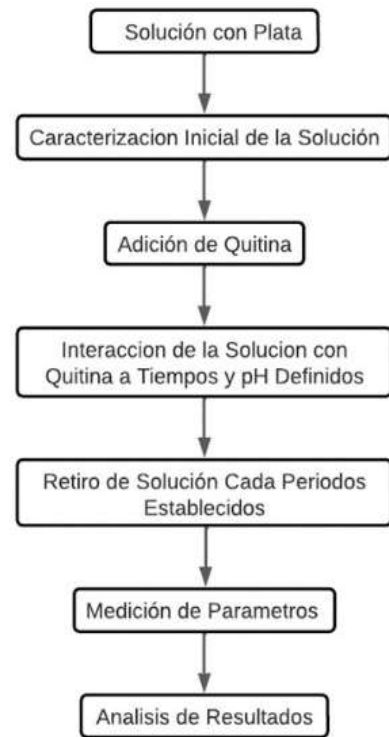


Fig. 3. Diagrama de flujo del procedimiento experimento general

a) Preparación del biosorbente

En los experimentos se utilizó quitosanos procedentes del caparazón de langostino blanco (*Litopenaeus vannamei*). En la figura 4 se muestra las fotografías de los bioadsorbentes siendo el procedimiento el siguiente: Las muestras de caparazón de langostino es tratada con una solución básica de NaOH al 10% (p/p) a temperatura ambiente durante 2 horas, con la finalidad de retirar las proteínas. El producto obtenido en esta etapa es la quitina calcárea. La siguiente etapa para obtener la quitina, consistió en tratar la quitina calcárea con una solución ácida de HCl al 10% (v/v) durante 15 minutos para extraer los minerales. Finalmente, para obtener el quitosano, la quitina es trata con NaOH al 50% (p/p) durante 1 hora a 120 °C y en la figura 5, se muestra la imagen de quitosano obtenida.



Fig. 4. (a) Fotografía de la quitina, (b) quitina calcárea y (c) quitosano



Fig. 5. Muestra de quitosano obtenida

b) *Análisis de humedad*

El contenido de humedad se calculó por gravimetría, según la norma ASTM F 2103-01. Se pesaron 0,5g de muestra, luego fueron secadas en estufa a 105 ± 2 °C hasta peso constante.

c) *Análisis granulométrico*

Las muestras de quitosano fueron previamente secadas y trituradas en un mortero, a continuación, se tamizarán para su separación por tamaños, utilizando para esto un juego de tamices A.S.T.M. Las características de los tamices que se emplearán se muestran en la tabla 5.

TABLA 5
TAMICES NORMALIZADOS POR A.S.T.M

N° malla	Tamaño de abertura (mm)
80	0.180
60	0.250
40	0.425
20	0.850

d) *Proceso de biosorción*

Para determinar la influencia del pH y tiempo de residencia se extrajo la solución con contenido de Ag^+ de concentración inicial conocida, a diferentes valores de pH (2, 4 y 6). El ajuste de pH se hizo con soluciones diluidas de hidróxido de sodio o ácido sulfúrico. El ensayo se realizó por lotes y consistió en poner en contacto 50 mL de la solución del ión metálico con 100 mg del biosorbente de malla entre 60, durante 40, 80 y 120 minutos para garantizar el logro de las condiciones de equilibrio, a un pH determinado con agitación constante a la temperatura de 20 °C. Finalmente, las muestras se filtrarán y en la solución remanente se determinó la concentración de Ag^+ en el equilibrio. Luego, se determinó la concentración del metal presente en la fase líquida mediante absorción atómica, a través de un balance de masa, se puede deducir la concentración de plata retenida por la biomasa; utilizando para ello la expresión matemática.

$$\eta = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100 \quad (1)$$

Donde:

η = porcentaje de reducción de plata (%).

Ci = concentración inicial de la solución.

Cf = concentración final de la solución.

Terminado las pruebas y obtenido los datos de concentración de plata, se procedió a realizar los balances metalúrgicos, donde se obtiene la ratio de concentración y la interpretación de los resultados.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en las tablas 6, 7 y 8 se muestran los resultados de varias pruebas experimentales que variaron el tiempo de residencia y el pH para determinar el porcentaje de reducción de plata.

TABLA 6
CONCENTRACIÓN DE PLATA DESPUÉS DE REALIZAR LOS ENSAYOS ($Ci = 14.01$ ppm)

Diseño	B: pH			
	2	4	6	
A: Tiempo de residencia (minutos)	40	7.12	1.30	4.46
	80	4.86	0.52	2.72
	120	5.80	2.41	3.88

TABLA 7. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE PLATA ($Ci = 14.01$ ppm)

Diseño	B: pH			
	2	4	6	
A: Tiempo de residencia (minutos)	40	49.20%	88.60%	68.20%
	80	65.30%	96.30%	80.60%
	120	58.60%	82.80%	72.30%

Como se puede observar en los resultados, la máxima reducción de plata del 96.30% se logró después de 80 minutos de tratamiento y pH=4.

TABLA 8
CUADRO RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA REDUCCIÓN DE PLATA DE AGUAS PROVENIENTE DEL RÍO GRANDE

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F_0	$F_{\alpha, v1, v2}$
Tratamiento A (Tiempo de residencia)	2.0	5.6612	2.8306	490.6646	3.55
Tratamiento B (pH)	2.0	87.8335	43.9168	7612.6050	3.55

Interacción					
AB	4.0	12.1433	3.0358	526.2362	2.93
Error	18.0	0.1038	0.0058		
Total	26.0	105.7419			

Como se puede apreciar en los resultados, para cada variable independiente, así como su interacción, $F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$, lo cual significa que existen buenas razones para afirmar que afectan el porcentaje de reducción de plata.

Según la figura 6, se confirmó la determinación del tiempo óptimo para la reducción de plata de las aguas del Río Grande – 96.30% después de 80 minutos de tratamiento

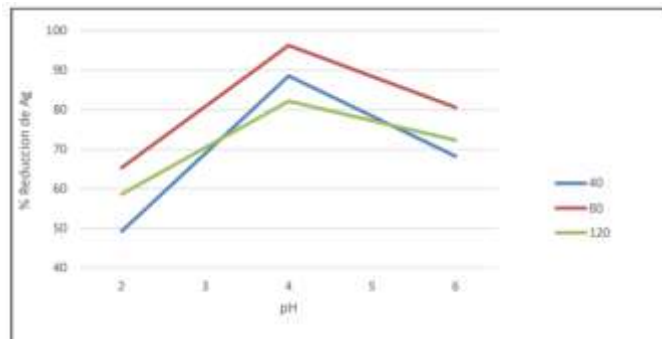


Fig. 6. Resultado del porcentaje de reducción de Ag después de realizar los ensayos

Esto se confirmó de nuevo al nivel de significancia del 95 % previamente revelado mediante el análisis de varianza, donde el tiempo de residencia tuvo un efecto significativo en el porcentaje de reducción de plata con $F_0 = 490,6646 > F_{0,005, 2,18} = 3,55$.

La adsorción es un proceso en el que intervienen diversas etapas: difusión externa, difusión interna, fijación superficial y transferencia de materia en el sistema. Por lo tanto, para cada sistema metal-adsorbente se establecen equilibrios determinados y la velocidad de adsorción dependerá fundamentalmente de la naturaleza de estas relaciones. En todos los procesos de adsorción es necesario conocer el tiempo que el sistema tarda en alcanzar el equilibrio, es decir, el tiempo a partir del cual, por más que se mantenga el contacto entre el adsorbato y el metal, no se producirá más adsorción [16].

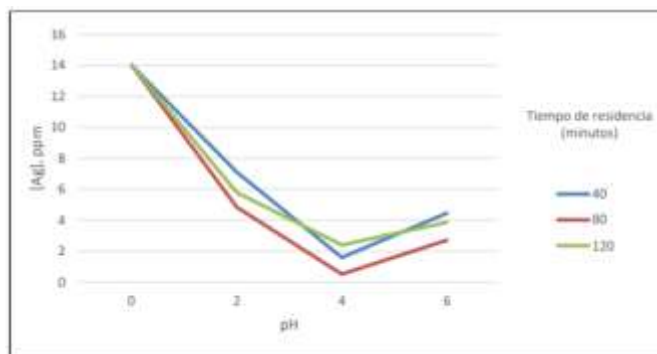


Fig. 7. Resultados de la concentración de plata después de realizar los ensayos (Ci = 14.01 ppm) con la influencia del tiempo de residencia y pH.

En la figura 7, en cuanto al efecto del pH sobre el porcentaje de reducción de plata por biopolimerización en agua del Río Grande, se encontró que pH 4 es el parámetro óptimo. Esto fue confirmado por el siguiente análisis de nivel de significación de la varianza del 95% de los valores encontrados $F_0 = 7612,6050 > F_{0,005, 2,18} = 3,55$

Ello lo corrobora Giles & Hassan [17], los cuales en su investigación afirman que el valor de pH de la fase acuosa es otro de los factores más importante tanto en la biosorción de cationes y aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la biosorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4,5 la adsorción de aniones se favorece con valores de pH entre 1,5 y 4,0. Existen tres vías de influencia del pH en la biosorción del metal.

Primero: El estado químico del sitio activo podría cambiar con el valor del pH. Cuando el grupo de unión al metal es débilmente ácido o básico, la disponibilidad del sitio libre depende del pH. Los grupos ácidos tienden a liberar protones, especialmente en medio básico, mientras que los grupos básicos tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido. De esta forma pueden aparecer cargas positivas o negativas en la superficie del biosorbente. En general, si el pH del medio es mayor que el punto de carga cero del biosorbente (pH en el cual el número de cargas positivas es igual al de cargas negativas de forma tal que la carga neta sobre la superficie sea cero), se tendrá un predominio de las cargas positivas en la superficie del biosorbente. Así, pues, las condiciones en las que un biosorbente tenga una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes, y aquellas en las que presente una carga neta positiva, lo serán para adsorber aniones [18].

Segundo: Valores extremos de pH, como los empleados en la regeneración (desorción) del sorbente, podrían dañar la estructura del material. En este sentido, la distorsión de las células, pérdida significativa de peso molecular promedio y descenso en la capacidad de adsorción, son algunos de los efectos observados por diversos investigadores [19].

Tercero: La forma iónica del metal en solución depende del pH. Los metales en soluciones acuosas se encuentran como iones hidrolizados a valores de pH bajo, especialmente como aniones de metales de alta carga y pequeño tamaño. También hay que considerar que a valores bajos de pH la concentración de protones es elevada y éstos pueden competir con los iones de metal por unirse al adsorbente [20, 21].

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que el tiempo óptimo para la reducción de plata de agua proveniente del Río Grande fue de 96.30 % a 80 minutos de tratamiento utilizando un quitosano obtenido de un langostino blanco (*Litopenaeus vannamei*). Con respecto al pH sobre el porcentaje de reducción de plata se encontró que el parámetro óptimo fue a pH 4. Siendo así la influencia significativa de la interacción de ambas variables independientes (tiempo de residencia y pH) sobre la variable dependiente (porcentaje de reducción de plata). Así mismo se corroboró para ambas un nivel de significancia de 95 %, lo anteriormente expuesto mediante el análisis de varianza donde el tiempo de residencia afecta significativamente al porcentaje de reducción de plata.

REFERENCIAS

- [1] V. Hernández, V. Reyes y M. Veloz, «Estudio de cargas anódicas, para determinar el depósito selectivo de doré de soluciones sintéticas e industriales,» Hidalgo, 2018.
- [2] N. Burciaga Montemayor, J. Claudio Rizo, L. Cano Salazar, A. Martínez Luévanos y P. Vega Sánchez, «Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción,» *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, n° 23, pp. 1-13, 2020.
- [3] A. Waheed, M. Mansha y N. Ullah, «Nanomaterials-based electrochemical detection of heavy metals in water: Current status, challenges and future direction» *Trends in Analytical Chemistry*, n° 105, pp. 37-51, 2018.
- [4] C. F. Carolin, P. S. Kumar, A. Saravanan, G. J. Joshiba y M. Naushad, «Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, pp. 2782-2799, 2017.
- [5] A. Ihsanullah Abbas, A.-A. A. M. T. Laoui, M. J. Al-Marri, M. S. Nasser, M. Kraishah y M. A. Atieh, «Heavy metal removal from aqueous solution by advanced carbon nanotubes: Critical review of adsorption applications» *Separation and Purification Technology*, n° 157, pp. 141-161, 2016.
- [6] X. Xue, R. Cheng, L. Shi, Z. Ma y X. Zheng, «Nanomaterials for water pollution monitoring and remediation» *Environmental Chemistry Letters*, pp. 23-27, 2017.
- [7] S. Pabón, R. Benítez, S. Villa y J. Gallo, «Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. XIV, n° 27, pp. 9-18, 2020.
- [8] G. Herrera, V. Landeros, R. Vargas y R. Esthela, «Aplicación del refinamiento Rietveld para la identificación de fases del ZnO obtenido por precipitación química,» *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. IX, n° 2, pp. 90-96, 2021.
- [9] A. Cuauhtémoc, A. Rodríguez, G. Martínez, A. Calderón, O. Trujillo, G. Aguilar y A. Cabello, «Neurotoxicidad en trabajadores petroquímicos con bajos índices de exposición a disolventes orgánicos,» *Salud pública de México*, vol. LXIV, n° 3, pp. 290-298, 2022.
- [10] W. Huesa, «Tratamiento de aguas,» Sevilla, 2021.
- [11] F. M. y G. M., «Bioresource Technology» n° 3-14, 2014.
- [12] A. A. y E. A., «Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A review for removing heavy metals from industrial effluents: A review for removing heavy metals from industrial effluents: A review» pp. 100-503, 2020.
- [13] Mangwandi y Albadarin, «Comparative biosorption of chromium (VI) using chemically modified date pits (CM-DP) and olive stone (CM-OS): Kinetics, isotherms and influence of co-existing ions» pp. 251-262, 2020.
- [14] M. L. Rodríguez Martínez, «Adsorción de metales pesados mediante biocompositos con base en quitina de diferentes grados de acetilación,» Mexico, 2018.
- [15] ANA, «Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales», *Drupal*. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0> (accedido 7 de mayo de 2023).
- [16] M. Lee, K. Hong, T. Kajiuchi y J. Yang, «Determination of the efficiency and removal mechanism of cobalt by crab shell particles»

Journal of Chemical Technology and Biotechnology, n° 16, 2014.

- [17] C. H. Giles y A. S. A. Hassan, «Adsorption at Organic Surfaces V—A Study of the Adsorption of Dyes and Other Organic Solutes by Cellulose and Chitin», *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, vol. 74, n.º 12, pp. 846-857, 1958, doi: 10.1111/j.1478-4408.1958.tb02236.x.
- [18] S. Schiewer y B. Volesky, «Modelling of the proton-metal ion exchange in biosorption» *Environmental Science and Technology*, n° 12, 2015.
- [19] I. Aldor, E. Fourest y B. Volesky, «Desorption of cadmium from algal biosorbent» *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, n° 16, 2015.
- [20] I. Villaescusa, N. Fiol, M. Martinez, N. Miralles, J. Poch y J. Serrarlos, «Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes» *Water Research*, 2014.
- [21] J. R. Jáuregui Nongrados, «Adsorción y desorción de iones plata sobre quitina y quitosano de *Litopenaeur Vannamei*,» Lima, 2016.