



Bioadsorción de cromo total con tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*) en soluciones acuosas

*Total chromium bioadsorption using immobilized queñua (*Polylepis incana*) tannin in aqueous solutions*

Bioadsorção de cromo total com tanino imobilizado de queñua (*Polylepis incana*) em soluções aquosas

Higinio Zuñiga¹

Universidad Nacional del Altiplano, Puno – Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0002-8204-1847>

hazuniga@unap.edu.pe

Roxana Medina

Universidad Hipócrates, Acapulco – Estado de Guerrero, México

Universidad Nacional del Altiplano, Puno – Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0003-2237-1198>

rmedina@unap.edu.pe (correspondencia)

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.rca.2026.01.002>

Recibido: 05/12/2025 Aceptado: 03/02/2026 Publicado: 10/02/2026

PALABRAS CLAVE

adsorción, biosorción, cromo, metales pesados, tratamiento de aguas residuales.

RESUMEN. Los desechos industriales generados en las curtiembres que poseen metales pesados como Cr(VI) y cromo total representan graves riesgos tanto para el medio ambiente como para la salud de la población, debido a su alta toxicidad, capacidad mutagénica y potencial cancerígeno. El objetivo de la investigación fue analizar la capacidad de bioadsorción de los iones de cromo (VI) y cromo total a partir de soluciones acuosas utilizando tanino inmovilizado extraído de la corteza de queñua (*Polylepis incana*). La metodología utilizada fue la obtención de extracto tánico de la corteza de queñua y seguidamente su polimerización con formaldehído al 37% con el que se obtuvo el tanino inmovilizado. La caracterización del tanino inmovilizado se realizó a través de la espectroscopía infrarroja (IR), donde se identificaron grupos funcionales capaces de adsorber el cromo total. La cinética del cromo total se ajustó mejor con el modelo cinético de pseudo segundo orden, donde el valor de $q_e = 5.568$ mg/g indica la cantidad de cromo adsorbido por gramo de bioadsorbente en equilibrio y el valor de $k_2 = 0.335$ g/mg.min está vinculado con la velocidad total de la bioadsorción de cromo por tanino inmovilizado de queñua y el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9995$ indica que es el mejor ajuste. Se concluye que el proceso de bioadsorción con tanino inmovilizado tiene la capacidad de adsorber los iones Cr(VI) y cromo total.

KEYWORDS

ABSTRACT. Industrial wastes generated by tanneries that contain heavy metals such as Cr(VI) and total chromium pose serious risks to both the environment and public health due to their high

¹ Ingeniero Químico por la Universidad Nacional del Altiplano, Perú.



adsorption, biosorption, chromium, heavy metals, wastewater treatment.

toxicity, mutagenic capacity, and carcinogenic potential. This study aimed to analyze the biosorption capacity of Cr(VI) and total chromium ions from aqueous solutions using immobilized tannin extracted from queñua (*Polylepis incana*) bark. The methodology involved obtaining a tannin extract from queñua bark and subsequently polymerizing it with 37% formaldehyde to produce the immobilized tannin. The immobilized tannin was characterized by infrared spectroscopy (IR), where functional groups capable of adsorbing total chromium were identified. Total chromium kinetics were best fitted by the pseudo-second-order kinetic model, in which $q_e = 5.568$ mg/g represents the amount of chromium adsorbed per gram of bioadsorbent at equilibrium, and $k_2 = 0.335$ g/(mg·min) is associated with the overall biosorption rate; the correlation coefficient $R^2 = 0.9995$ indicates the best fit. It is concluded that the biosorption process using immobilized tannin is capable of adsorbing Cr(VI) and total chromium ions.

PALAVRAS-CHAVE

adsorção, bioadsorção, cromo, metais pesados, tratamento de águas residuais.

RESUMO. Os resíduos industriais gerados por curtumes que contêm metais pesados, como Cr(VI) e cromo total, representam graves riscos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde pública, devido à sua elevada toxicidade, capacidade mutagênica e potencial carcinogênico. O objetivo deste estudo foi analisar a capacidade de bioadsorção dos íons de Cr(VI) e de cromo total em soluções aquosas utilizando tanino imobilizado extraído da casca de queñua (*Polylepis incana*). A metodologia consistiu na obtenção do extrato tânico da casca de queñua e, em seguida, na sua polimerização com formaldeído a 37% para a obtenção do tanino imobilizado. A caracterização do tanino imobilizado foi realizada por espectroscopia no infravermelho (IR), na qual foram identificados grupos funcionais capazes de adsorver o cromo total. A cinética do cromo total ajustou-se melhor ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem, no qual $q_e = 5.568$ mg/g indica a quantidade de cromo adsorvida por grama de bioadsorvente em equilíbrio, e $k_2 = 0.335$ g/(mg·min) está associado à taxa global de bioadsorção; o coeficiente de correlação $R^2 = 0.9995$ indica o melhor ajuste. Conclui-se que o processo de bioadsorção com tanino imobilizado tem capacidade de adsorver os íons Cr(VI) e cromo total.

1. INTRODUCCIÓN

Los desechos generados durante el proceso de curtido tienen efectos nocivos tanto para la salud como para el medio ambiente, ya que solo se utiliza un 70% del total de cromo (Cr) aplicado en esta etapa; por lo tanto, la bioadsorción se presenta como una solución para eliminar metales pesados (Rodríguez Yupanqui & Quezada Alvarez, 2020). Los taninos son sustancias orgánicas de origen vegetal, biodegradables y no tóxicas, pertenecientes al grupo de los polifenoles, que se obtienen principalmente de la corteza de árboles como el quebracho, la mimosa y el castaño. Estos compuestos presentan afinidad por los iones de metales pesados presentes en medios acuosos. Sin embargo, su alta solubilidad en agua restringe su uso directo como adsorbentes, por lo que es necesario aplicar procesos de inmovilización mediante modificaciones químicas para mejorar su desempeño (Chabaane et al., 2011); los taninos son biopolímeros naturales que se encuentran en abundancia y son económicos, además de ser fáciles de extraer y transformar en formas insolubles, como geles y espumas de tanino, o en matrices inmovilizadas.

Los materiales adsorbentes hechos de taninos (TBA) poseen afinidad para captar metales pesados, tintes, agentes tensioactivos y fármacos en aguas contaminadas, así como para acumular metales preciosos y críticos específicos de los efluentes acuosos (Cuetocue Petins et al., 2021). Se ha utilizado la cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la remoción de cromo de aguas contaminadas con cromo (Pérez Antolinez et al., 2020). El tanino inmovilizado de Persimmon se ha utilizado en la investigación para eliminar el cromo hexavalente y el cromo total con un rendimiento del 98.04% (Cheng et al., 2022). Existen muchos métodos para la eliminación de Cr(VI) del agua, como la reducción electrolítica, la precipitación química, el intercambio iónico, la separación por membranas, la adsorción y algunos métodos de reparación de biomasa. Estos procesos son

extremadamente costosos, ineficientes cuando las concentraciones de los metales pesados disueltos son del orden de 1 a 100 mg/L (Fei & Hu, 2023). Alternativamente, el proceso de bioadsorción utiliza bioadsorbentes de origen vegetal, como los taninos de la corteza de pino, taninos a base de caqui, gel tánico de castaña, cáscara de arroz, cáscara de naranja (Ampiauw & Lee, 2020; Auad et al., 2020; Cuetocue Petins et al., 2021; Zhang & Tian, 2020).

En años recientes, el tanino que proviene del caqui ha atraído considerable interés entre los científicos debido a su elevado contenido de grupos hidroxilos fenólicos, los cuales poseen una notable capacidad de quelación de diversos iones de metales pesados. De acuerdo con Yahya et al. (2020), entre las metodologías aplicadas para la eliminación de metales tóxicos se incluyen el intercambio iónico, la precipitación, la ósmosis inversa, la evaporación, la reducción química, la electrolisis y la electrodiálisis. En este contexto, la adsorción mediante materiales adsorbentes económicos o bioadsorbentes de bajo costo se ha establecido como una de las estrategias más eficientes y asequibles para remover metales pesados. Se ha observado que la remoción de cromo se ve significativamente influenciada por cambios en el pH, alcanzando un valor máximo alrededor de pH 1; además, el proceso de adsorción se explica adecuadamente mediante el modelo de Langmuir y los parámetros termodinámicos sugieren que la adsorción es viable y ocurre de manera espontánea. Según Alvares Rodrigues et al. (2015), la dosis óptima de adsorbente para la captura de cromo sobre tanino inmovilizado fue de 0.1 g. Asimismo, el fundamento químico del proceso de gelificación de taninos para obtener tanino inmovilizado ha sido objeto de extensos estudios, existiendo abundante información tanto en la literatura científica como en registros de patentes (Sadegh et al., 2023).

Las condiciones experimentales de gelificación utilizan formaldehído u otro aldehído en un entorno básico o ácido, el formaldehído y otros aldehídos reaccionan con los taninos para inducir la polimerización a través de enlaces de puentes de metileno en posiciones reactivas en las moléculas de flavonoides de tanino (Sánchez-Martín et al., 2011). Los biosorbentes vegetales se emplean para la adsorción de metales pesados debido a sus proteínas, carbohidratos y componentes fenólicos que contienen grupos carboxil, sulfatos, fosfatos y grupos amino que pueden captar los iones metálicos pesados (Cuetocue Petins et al., 2020). Los taninos son una biomasa natural que poseen múltiples grupos hidroxilo adyacentes y que muestran una afinidad específica por los iones metálicos (Schiewer & Volesky, 2000).

De acuerdo con lo mencionado, en este estudio se estableció un objetivo principal: Analizar la bioadsorción del cromo total en soluciones acuosas utilizando tanino inmovilizado extraído de la corteza de queñua (*Polylepis incana*). Además, se plantearon los siguientes objetivos específicos: a) Desarrollar un bioadsorbente mediante la obtención y caracterización del gel tánico de la corteza de queñua (*Polylepis incana*), y b) Evaluar la eficacia del tanino inmovilizado de la corteza de queñua (*Polylepis incana*) en la bioadsorción de los iones de cromo Cr(VI) y cromo total en soluciones acuosas.

2. METODOLOGÍA

Ámbito del estudio

El estudio se llevó a cabo en el Mega laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano, ubicado a 3827 m s. n. m., en las coordenadas 15°50'26" de latitud sur y 70°01'28" de longitud oeste. Los análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima) y en la Universidad Nacional de San

Agustín (UNSA). Por su parte, la determinación de cromo fue efectuada en el Laboratorio Analítico del Sur (LAS), acreditado por INACAL (registro N° LE-050), situado en la ciudad de Arequipa.

Descripción de métodos

Las muestras de las cortezas de queñua se recolectaron de la comunidad de Quello Quello, distrito de Lampa y departamento de Puno. Las que secaron al ambiente, las que fueron pulverizadas hasta malla 80 (150 µm).

Obtención del tanino inmovilizado

La extracción de taninos se realizó por triplicado. Para ello, se pesaron 25 g de muestra, los cuales se colocaron en un equipo Soxhlet con sistema de reflujo total y con agua para refrigerar. Se añadieron 200 mL de alcohol etílico al 95 % y se mantuvo el proceso a 70 °C durante 2 horas. Finalizada la extracción, las muestras fueron filtradas utilizando papel filtro de rápida filtración. Los extractos obtenidos se dispusieron en placas Petri de 100 × 15 mm y se sometieron a secado en estufa durante 8 horas, tras lo cual se cuantificó el contenido de taninos extraídos. Para la inmovilización, se tomó una porción de 5 g del tanino obtenido, a la que se adicionó hidróxido de sodio 0.125 M, completando el volumen con agua para diluir el extracto tánico. La mezcla se sometió a agitación magnética con calentamiento a 80 °C, tras lo cual se añadieron 10 mL de formaldehído al 37 %. Este procedimiento permitió la polimerización del tanino durante 8 horas, obteniéndose finalmente el tanino inmovilizado.

Caracterización del tanino inmovilizado

El tanino inmovilizado se sometió a análisis por espectroscopía infrarroja con un espectrofotómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) Perkin Elmer Spectrum versión 10.0. Esto se realizó para verificar su composición química e identificar los grupos funcionales presentes en el tanino inmovilizado.

Proceso de bioadsorción de cromo

Para el análisis de cromo, se preparó una solución estándar de dicromato de potasio de 100 mg/L en agua desionizada y se colocó en un recipiente de 1000 mL con tapa (Kim & Nakano, 2005). Se prepararon 50 mL de dicromato de potasio con una concentración inicial (100 mg/L) en ocho matraces Erlenmeyer. Se añadió 0.05 g (50 mg) de tanino inmovilizado, y el pH inicial de la solución se ajustó con HCl 0.1 M y NaOH 0.125 M. Los matraces fueron etiquetados y se agitaron a (20–40) °C. Luego las soluciones se filtraron a través de papel de filtro Whatman. Para calcular la capacidad de adsorción se utilizó la ecuación (1) descrita por (Chu & Hashim, 2007). Las muestras fueron enviadas para análisis al Laboratorio Analítico del Sur de Arequipa.

$$q_t = \frac{V \cdot (C_i - C_f)}{m} \quad (1)$$

Donde: " q_t " es la capacidad de adsorción (mg/g); " C_i " y " C_f " son las concentraciones iniciales y final del adsorbato (mg/L); " V " es el volumen de la solución (L) y " m " es la cantidad de adsorbente utilizado (g). Para el cálculo del porcentaje de adsorción "%A", se hace uso de la ecuación (2) descrita por (Netzahuatl, 2009).

$$\%A = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Modelos cinéticos

Para la cinética de adsorción se colocaron en 8 matraces Erlenmeyer de 50 mL de solución con una concentración inicial de 100 mg/L de dicromato de potasio y se procesaron con diferentes tiempos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 60 minutos. A continuación, se muestran los modelos cinéticos en la Tabla 1.

Tabla 1

Modelos cinéticos para la bioadsorción de Cr(VI) y cromo total

Modelo cinético	Ecuación
Pseudo primer orden	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} * t$
Pseudo segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t$

Nota. Elaborado por Cui et al. (2013); Revellame et al. (2020).

Donde: “ q_t ” es la capacidad de adsorción en el tiempo t (mg/g); “ q_e ” es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g); “ t ” es el tiempo (min); “ k_1 ” es la constante cinética de pseudo primer orden (L/min); “ k_2 ” es la constante cinética de pseudo segundo orden (g/mg.min); “ h ” es la velocidad inicial de adsorción, definida como $h = k_2 * q_e^2$ (mg/g.min); como lo describe Meethale Kunnambath y Thirumalaisamy (2015).

3. RESULTADOS

Los resultados de los análisis realizados se detallan a continuación:

Tabla 2

*Obtención de tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*) con agitador magnético a calefacción de 80°C*

Muestra de extracto tánico (g)	Na(OH) al 0.125 M más H ₂ O (mL)	Formaldehído al 37% (mL)	Tanino inmovilizado (g)
5	62	10	5.7453
5	62	10	6.4292
5	62	10	5.7453
5	60	10	6.1455
5	60	10	6.2328
5	60	10	5.7713
5	60	10	5.7588
5	60	10	5.8874

Existe una variación mínima en la cantidad de tanino inmovilizado obtenido, debido a la cantidad uniforme de hidróxido de sodio 0.125 M y formaldehído 37%.

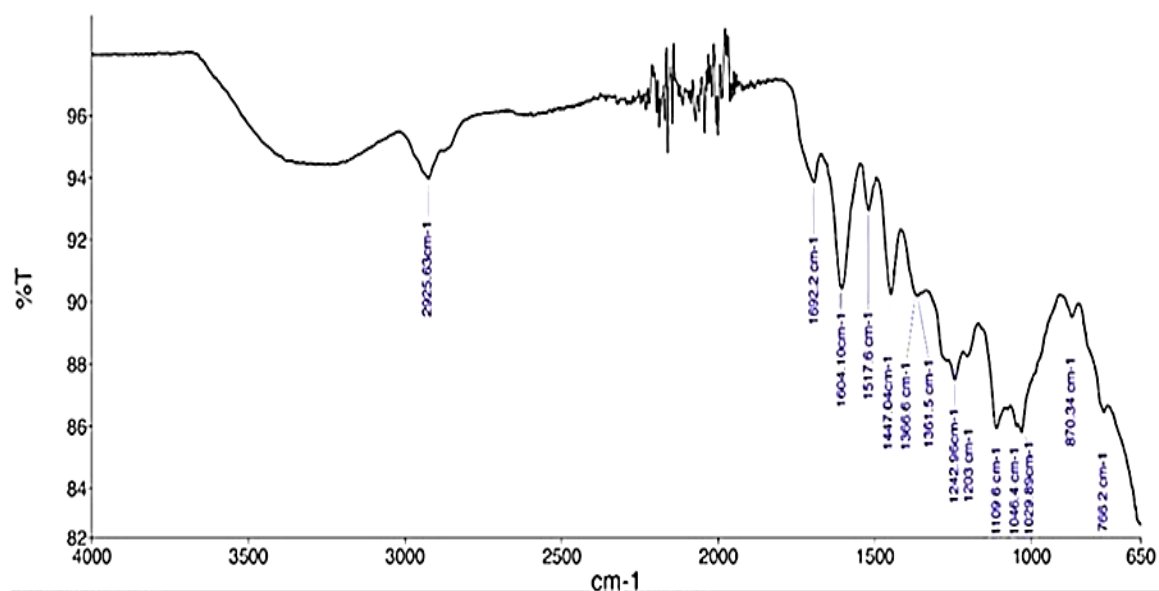
En la Tabla 3 se muestra el lavado de tanino inmovilizado para eliminar los restos de NaOH y formaldehído.

Tabla 3

Lavado del tanino inmovilizado obtenido a partir de queñua (*Polylepis incana*)

Muestra de tanino inmovilizado (g)	HNO ₃ al 0.01 M (mL)	Lavado con agua destilada 5 veces (mL)	Tanino inmovilizado (g)
5.7453	40	50	4.9271
6.4292	40	50	5.0451
5.7453	40	50	4.3908
6.1455	40	50	5.3908
6.2328	40	50	5.4624
5.7713	40	50	4.9562
5.7588	40	50	4.9473
5.8874	40	50	5.2145

Figura 1

Espectro infrarrojo (FT-IR) del tanino inmovilizado de queñua secada (*Polylepis incana*)

Nombre de la muestra	Descripción
27693 - Gel tanico de queñua (<i>Polylepis incana</i>) UNA- PUNO	27693 - Gel tanico de queñua (<i>Polylepis incana</i>) UNA- PUNO --- By Investigacion Date Tuesday, October 15 2019

Nota. Elaborado con datos de laboratorio LABINVSEV de la UNAS.

El tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*) muestra una banda moderada entre 3600 y 3000 cm⁻¹ correspondiente a las vibraciones de estiramiento del enlace O-H típico de compuestos fenólicos o taninos. La banda de estiramiento simétrica 1925.63 cm⁻¹ presenta un enlace C-H (CH₂-). Asimismo, la banda de estiramiento a 1692.22 cm⁻¹ muestra un enlace C=O característico del grupo funcional carbonilo según (Alvares Rodrigues et al., 2015).

Cinética de Bioadsorción de Cr(VI)

Durante la evaluación de la cinética de bioadsorción de Cr(VI) empleando tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*), se llevaron a cabo ocho ensayos experimentales a distintos tiempos de contacto. En cada

ensayo se trabajó con 50 mL de solución con una concentración inicial de 100 mg/L, utilizando 1 g de bioadsorbente, a pH 2 y una temperatura de 20 °C. Los datos obtenidos se emplearon para el cálculo de los modelos cinéticos (Tabla 4), mientras que los valores normalizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4

Capacidad de bioadsorción de Cr(VI) mediante bioadsorbente de tanino inmovilizado de queñua (Polylepis incana). Temperatura de 20°C y pH=2. Método de ensayo para cromo por ICP/OES en soluciones

Muestra	Gel Tánico (g/L)	[Cr(VI)] Inicial (mg/L)	Volumen de solución de Cr(VI) (mL)	Tiempo de agitación (min)	[Cr(VI)] En el equilibrio (mg/L)	Cantidad de Cr(VI) adsorbido mg/g tanino inmovilizado	cromo total Cr (mg/L)
1	1,0024	100	50	5	0,005	4,9878	14,71
2	1,0004	100	50	10	1,95	4,9006	14,9
3	1,0011	100	50	15	1,43	4,9236	12,23
4	1,0012	100	50	20	1,715	4,9084	12,91
5	1,0005	100	50	25	0,005	4,9973	14,08
6	1,0007	100	50	30	0,005	4,9963	9,485
7	1,0012	100	50	40	0,005	4,9938	8,925
8	1,0012	100	50	60	0,005	4,9938	10,41

Tabla 5

Capacidad de bioadsorción de Cr(VI) utilizando bioadsorbente tanino inmovilizado de queñua (Polylepis incana). Temperatura 40°C y pH=2. Método de ensayo para cromo por ICP/OES en soluciones

Muestra	Gel Tánico (g/L)	[Cr(VI)] Inicial (mg/L)	Volumen de solución de Cr(VI) (mL)	Tiempo de agitación (min)	[Cr(VI)] En el equilibrio (mg/L)	Cantidad de Cr(VI) adsorbido mg/g tanino inmovilizado	cromo total Cr (mg/L)
1	1,0063	100	50	5	0,15	4,9612	25,765
2	1,0036	100	50	10	23,54	3,8093	39,31
3	1,0044	100	50	15	1,06	4,9252	30,76
4	1,0090	100	50	20	0,005	4,9552	21,495
5	1,0008	100	50	25	1,025	4,9448	25,45
6	1,0045	100	50	30	1,135	4,9211	27,27
7	1,0049	100	50	40	13,045	4,3265	15,775
8	1,0062	100	50	60	1,22	4,9085	14,24

Tabla 6

Capacidad de bioadsorción de Cr(VI) con bioadsorbente de tanino inmovilizado de queñua (Polylepis incana). Temperatura 40°C y pH=4. Método de ensayo para cromo por ICP/OES en soluciones

Muestra	Gel Tánico (g/L)	[Cr(VI)] Inicial (mg/L)	Volumen de solución de Cr(VI) (mL)	Tiempo de agitación (min)	[Cr(VI)] En el equilibrio (mg/L)	Cantidad de Cr(VI) adsorbido mg/g tanino inmovilizado	cromo total Cr (mg/L)
1	1,0025	100	50	5	62,510	1,7102	83,060
2	1,0095	100	50	10	0,690	4,91878	29,730
3	1,0062	100	50	15	30,425	3,4573	48,865
4	1,0006	100	50	20	22,605	3,8674	39,345
5	1,0004	100	50	25	4,945	4,7508	23,070
6	1,0006	100	50	30	40,82	2,9572	81,785
7	1,0025	100	50	40	44,586	2,7638	81,745
8	1,0004	100	50	60	61,890	1,9048	93,535

Cinética de Bioadsorción de Cr(VI) y cromo total

Para analizar la cinética de bioadsorción de Cr(VI) utilizando gel tánico de queñua (*Polylepis incana*), se realizaron ocho ensayos experimentales a distintos tiempos de contacto. En cada ensayo se emplearon 50 mL de solución con una concentración inicial de 100 mg/L, usando 1 g de bioadsorbente, a pH 2 y una temperatura de 20 °C. Los modelos cinéticos se calcularon a partir de los datos presentados en las Tablas 7 y 8, mientras que los valores normalizados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 7

Resultados para la cinética de bioadsorción de Cr Total

*N	t (min)	Co(mg/L)	m (g)	V (mL)	Ce (mg/L)	Cr (mg/L)	q (mg/g)	A%
1	5	100	1	50	14,71	85.29	4.26	85.29
2	10	100	1	50	14,90	85.10	4.26	85.10
3	15	100	1	50	12,23	87.77	4.39	87.77
4	20	100	1	50	12,91	87.09	4.35	87.09
5	25	100	1	50	14,08	85.92	4.30	85.92
6	30	100	1	50	9,485	90.52	4.53	90.52
7	40	100	1	50	8,925	91.08	4.55	91.08
8	60	100	1	50	10,41	89.59	4.48	89.59

Tabla 8

Resultados para la cinética de bioadsorción de Cr(VI)

N	t (min)	Co(mg/L)	m (g)	v (mL)	Ce (mg/L)	Cret (mg/L)	q(mg/g)	A%
1	5	100	1	50	0.15	99.85	4.99	99.85
2	10	100	1	50	23.54	76.46	3.82	76.46
3	15	100	1	50	1.06	98.94	4.95	98.94
4	20	100	1	50	0.07	99.93	5.00	99.93
5	25	100	1	50	1.025	98.975	4.95	98.98
6	30	100	1	50	1.135	98.865	4.94	98.87
7	40	100	1	50	13.045	86.955	4.35	86.96
8	60	100	1	50	1.22	98.78	4.94	98.78

Tabla 9

Resultados de datos de cinética normalizados para el Cr(VI)

n	t (min)	Co(mg/L)	M (g)	V (mL)	Ce (mg/L)	Cret (mg/L)	Q (mg/g)	A%
1	5	100	1	50	23.54	76.46	3.82	76.46
2	10	100	1	50	13.045	86.96	4.35	86.96
3	15	100	1	50	1.95	98.05	4.90	98.05
4	20	100	1	50	1.715	98.29	4.91	98.29
5	25	100	1	50	1.43	98.57	4.93	98.57
6	30	100	1	50	1.025	98.98	4.95	98.98
7	40	100	1	50	0.15	99.85	4.99	99.85
8	60	100	1	50	0.07	99.93	5.00	99.93

Modelos cinéticos de bioadsorción del Cromo (VI) y cromo total

Para la evaluación de la cinética de bioadsorción de Cr(VI) y cromo total con tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*) para lo que se realizaron 8 experimentos con diferentes tiempos, se agregó a cada volumen 50 mL una concentración inicial (C_0) 100 mg/L.

Modelo de pseudo primer orden

En el modelo de pseudo primer orden refiere que el ion metálico se adsorbe en un sitio activo sobre la superficie del adsorbente y puede ser determinado a partir de la ecuación 3 (Batoool et al., 2023).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t \quad (3)$$

Tabla 10

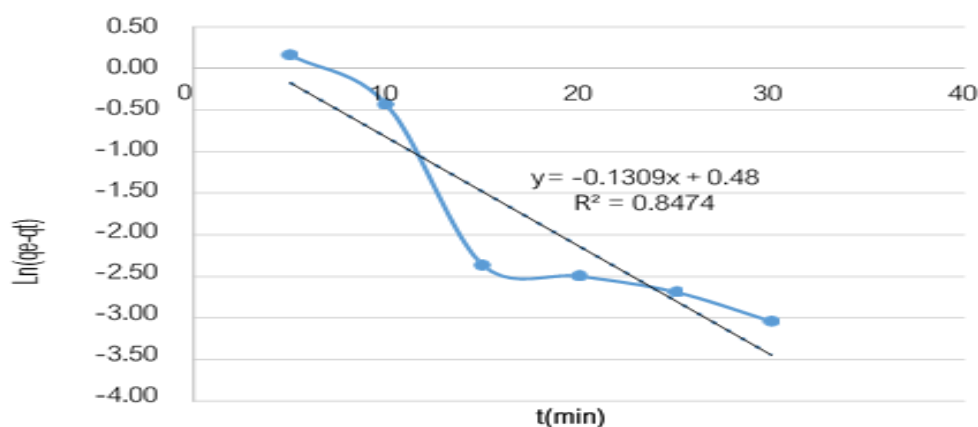
Resultados del modelo de pseudo primer orden para el Cr(VI)

n	Tiempo (min)	q _t (mg/g)	ln(q _e -q _t)
1	5	3.82	0.16
2	10	4.35	-0.43
3	15	4.90	-2.36
4	20	4.91	-2.50
5	25	4.93	-2.69
6	30	4.95	-3.04
7	40	4.99	----
8	60	5.00	----

En la Figura 2 se muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de pseudo primer orden en para el Cr(VI).

Figura 2

Ajuste del modelo de pseudo primer orden para el Cr(VI)



Nota. Elaborado en base datos de la Tabla 10.

La capacidad de adsorción de Cr(VI) en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de pseudo primer orden (k_1) determina el intercepto y de la pendiente de la gráfica de $\ln(q_e - q_t)$ versus t como se muestra en la ecuación 3. La constante cinética de pseudo primer orden $k_1 = 0.13 \text{ min}^{-1}$ señala la velocidad con la que se adsorben los iones Cr(VI) por gel tánico inmovilizado. El coeficiente de correlación $R^2 = 0.8474$ indica el ajuste de los datos cinéticos lo que concuerda con lo reportado por (Li et al., 2012; Xu et al., 2017), cuyos datos cinéticos con taninos inmovilizados de acacia negra con capacidad de adsorción en equilibrio de 7.4 mg/g y la constante cinética de pseudo primer orden $k_1 = 0.0368 \text{ min}^{-1}$, debido a que la concentración inicial tanino inmovilizado es de (60 mg/L).

Modelo de pseudo segundo orden para el Cr(VI) y cromo total

La ecuación de pseudo segundo orden en su expresión lineal esta descrita en la ecuación 4 (Batoool et al., 2023; Ho & McKay, 2003).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} * t \quad (4)$$

Tabla 11

Resultados del modelo pseudo segundo orden para el Cr(VI)

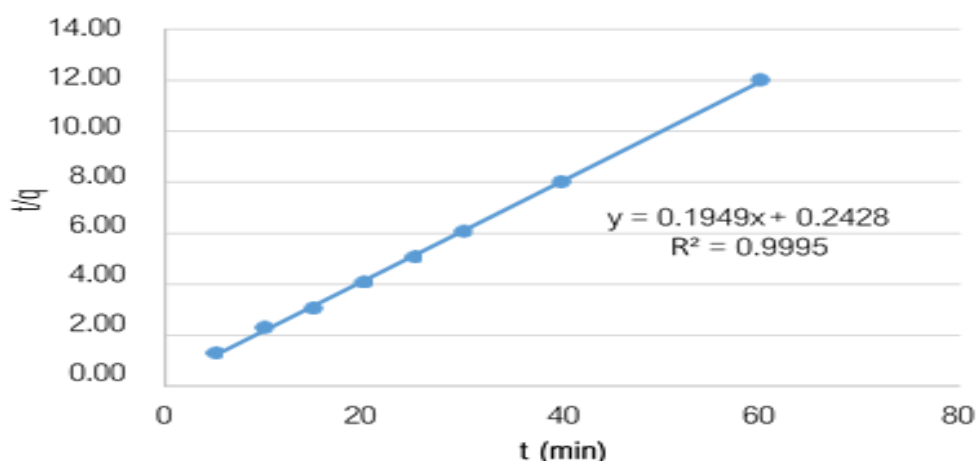
n	t (min)	q _t (mg/g)	t/q
1	5	3.82	1.31
2	10	4.35	2.30
3	15	4.90	3.06
4	20	4.91	4.07
5	25	4.93	5.07
6	30	4.95	6.06
7	40	4.99	8.01
8	60	5.00	12.01

Nota. Elaborado con datos de los cálculos de la Ecuación 4.

La Figura 3 muestra el ajuste de los datos experimentales al modelo de pseudo segundo orden y la ecuación lineal.

Figura 3

Ajuste de datos al modelo de pseudo segundo orden para el Cr(VI)



Nota. Elaborado con datos de la Tabla 11.

La capacidad de adsorción de Cr(VI) en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de pseudo segundo orden (k_2) determinan del intercepto y la pendiente de la gráfica de t/q_t versus t de la ecuación 4 según Madala et al., (2017). Siendo el valor de $q_e = 5.13$ mg/g que representa los iones Cr(VI) adsorbidos por gramo de adsorbente en equilibrio y el valor de $k_2 = 0.16$ g/mg.min está relacionado con la velocidad total de la bioadsorción de Cr(VI) por el tanino inmovilizado de queñua y el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9995$ indica el mejor ajuste. El modelo de pseudo segundo coincide con lo reportado por Chabaane et al. (2011) quienes observaron que la mayor capacidad de adsorción en el equilibrio el gel tánico de mimosa $q_e = 9.2$ mg/g la constante cinética de pseudo segundo orden $K_2 = 0.013$ g/mg.min.

Tabla 12

Constantes de los modelos cinéticos de adsorción Cr(VI)

Modelo cinético	Ecuación lineal	Constantes cinéticas	R ²
Pseudo Primer orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 * t$	$q_e, \text{mg/g}$ $k_1 \text{ h}^{-1}$	1.62 0.13 0.8474
Pseudo segundo orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 * t$	$q_e, \text{mg/g}$ $k_2, \text{mg/g. min}$	5.13 0.16 0.9995

Comparando los resultados el modelo de pseudo segundo orden es que mejor se ajusta a la velocidad de bioadsorción con $R^2 = 0.9995$. En la Tabla 13 se muestra el modelo pseudo segundo orden aplicando la ecuación (4).

Tabla 13

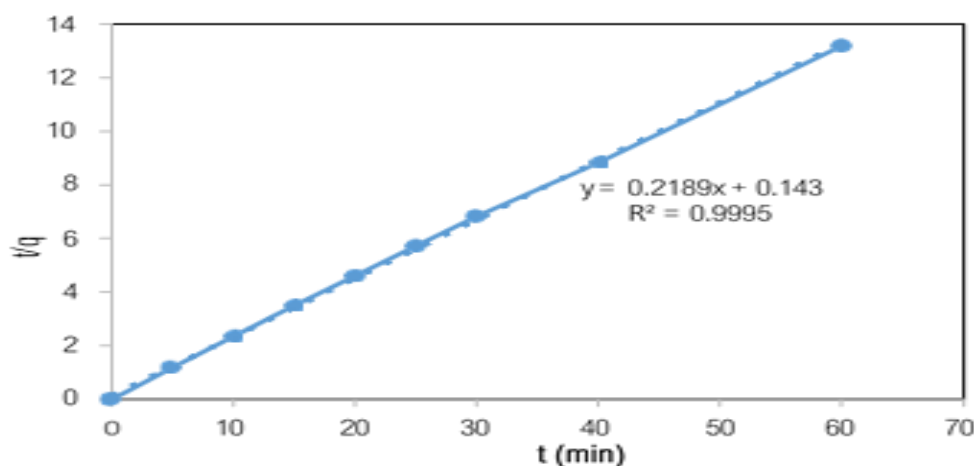
Resultados del modelo pseudo segundo orden para el Cr Total

n	t (min)	q _t (mg/g)	t/q
1	5	4.26	1.17
2	10	4.26	2.35
3	15	4.30	3.49
4	20	4.35	4.60
5	25	4.38	5.71
6	30	4.39	6.83
7	40	4.53	8.83
8	60	4.55	13.19

La Figura 4 presenta la correlación de los datos experimentales con el modelo cinético de pseudo segundo orden, así como su correspondiente ecuación lineal.

Figura 4

Ajuste de datos al modelo de pseudo segundo orden para el cromo total



Nota. Elaborado en base a la Tabla 13

En la Tabla 14 se muestran las constantes del modelo cinético de pseudo segundo orden para el cromo total

Tabla 14

Constantes de los modelos cinéticos de adsorción cromo total

Modelo cinético	Ecuación lineal	Constantes cinéticas	R ²
Pseudo segundo orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_2 * t$	$q_e, \text{mg/g}$ $k_2, \text{mg/g. min}$	4.568 0.335 0.9995

La capacidad de adsorción de Cr Total en el equilibrio (q_e) y la constante cinética de pseudo segundo orden (k_2) se tomaron del intercepto y de la pendiente de la gráfica de t/q_t versus t de la ecuación según Madala et al. (2017). Siendo el valor de $q_e = 5.568 \text{ mg/g}$ que representa el cromo adsorbido por gramo de adsorbente en equilibrio y $k_2 = 0.335 \text{ g/mg.min}$ está vinculado con la velocidad total de la bioadsorción de cromo total por el tanino inmovilizado de queñua y el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9995$ indica el mejor ajuste.

4. DISCUSIÓN

El tanino inmovilizado obtenido de la *Polylepis* experimenta un ligero incremento debido a que ocurre una polimerización por la reacción entre el extracto tánico con el hidróxido de sodio y el formaldehído como lo describe Kim et al., (2012) y posteriormente al lavado con ácido nítrico y agua donde ocurre una disminución del tanino inmovilizado como consecuencia de la eliminación de impurezas que concuerda con lo reportado por Aguilar-López et al. (2012) y Cuetocue Petins et al. (2021).

El espectro IR-FT evidenció una banda de estiramiento C=C propia de los alquenos y de los anillos aromáticos a 1604.1 cm^{-1} , mientras que el tanino inmovilizado mostró también una banda de absorción a 1203 cm^{-1} que se le asigna una flexión al grupo funcional O-H, la presencia de grupos funcionales demuestra una alta capacidad de bioadsorción del tanino inmovilizado, conforme con las investigaciones de Cuetocue Petins et al. (2020), que reportaron que la vibración del grupo funcional O-H desaparece después de la adsorción de Cr(VI) y cromo total formando enlaces O-Cr(VI)-O debido a las reacciones redox ocurridas entre el tanino inmovilizado y el Cr(VI).

Según lo observado en la Tabla 11 el modelo cinético que mejor se ajusta para la adsorción de Cr(VI) es el modelo de Pseudo segundo orden por proporcionar como resultados un coeficiente de correlación $R^2 = 0.998$ superior al modelo de Pseudo primer orden, lo mismo que una capacidad de adsorción en el equilibrio $q_e = 5.13 \text{ mg/g}$ y una constante cinética de Pseudosegundo orden $k_2 = 0.16 \text{ g/mg.min}$ está relacionado con la velocidad total de la bioadsorción de Cr(VI) por el tanino inmovilizado de queñua esto contrasta con Xu et al. (2017) que da para Cr(VI) un $R^2 = 0.999$, una capacidad de adsorción en equilibrio $q_e = 24.322 \text{ mg/g}$ y constante $k_2 = 0.00113 \text{ g/mg.min}$ con tanino inmovilizado de acacia negra, resultados semejantes ha obtenido Cui et al. (2013) con tanino inmovilizado de persimon ($R^2 = 0.999$).

Según los datos mostrados en la Tabla 13, Figura 4 y Tabla 14 para el cromo total el modelo que se ajusta mejor en la bioadsorción de cromo con el tanino inmovilizado de queñua (*Polylepis incana*) es el modelo cinético de pseudo segundo orden mostrando un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9995$ similar al Cr(VI) con $R^2 = 0.9995$ según a lo reportado por Zhang et al. (2022) en relación a la adsorción en equilibrio $q_e = 4.468 \text{ mg/g}$ y la constante cinética de pseudo segundo orden $k_2 = 0.335 \text{ mg/g.min}$ lo cual se vincula con la bioadsorción de cromo con el tanino inmovilizado de queñua, esto se contrasta con lo reportado Alvares Rodrigues et al. (2015).

5. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un bioadsorbente a partir del tanino extraído de la corteza de queñua (*Polylepis incana*) mediante inmovilización química. La caracterización por FT-IR confirmó la presencia de grupos funcionales fenólicos y carbonilos, cuya presencia le otorgó al gel tánico la capacidad adecuada para la adsorción de Cr(VI) y cromo total.

El tanino inmovilizado de queñua presentó alta eficiencia en la bioadsorción de Cr(VI) y cromo total, con remociones superiores al 99 % y 91 %, respectivamente, siguiendo una cinética de pseudo segundo orden que evidencia un mecanismo de adsorción química.

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores declaran que el presente proyecto no representó conflicto de intereses de ninguna parte.

Rol de los autores / Authors Roles:

Higinio Zuñiga: Investigación, curación de datos, validación, análisis formal, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, visualización.

Roxana Medina: Conceptualización, metodología, supervisión, validación, escritura – revisión y edición, administración del proyecto, recursos.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Los autores declaran que no recibieron un fondo específico para esta investigación.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Aguilar-López, J., Jaén-Jiménez, J. C., Vargas-Abarca, A. S., Jiménez-Bonilla, P., Vega-Guzmán, I., Herrera-Núñez, J., ... Soto-Fallas, R. M. (2012). Extracción y evaluación de taninos condensados a partir de la corteza de once especies maderables de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 25(4), 15–22. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i4.615>
- Alvares Rodrigues, L., Koibuchi Sakane, K., Nunes Simonetti, E. A., & Patrocínio Thim, G. (2015). Cr Total removal in aqueous solution by PHENOTAN AP based tannin gel (TFC). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 725–733. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.04.006>
- Ampiauw, R. E., & Lee, W. (2020). Persimmon tannins as biosorbents for precious and heavy metal adsorption in wastewater: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(8), 3835–3846. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02748-3>
- Auad, P., Spier, F., & Gutterres, M. (2020). Vegetable tannin composition and its association with the leather tanning effect. *Chemical Engineering Communications*, 207(5), 722–732. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1618843>
- Batool, F., Mohyuddin, A., Amjad, A., ul Hassan, A., Nadeem, S., Javed, M., Hafiz Dzarfan Othman, M., Wayne Chew, K., Rauf, A., & Kurniawan, T. A. (2023). Removal of Cd(II) and Pb(II) from synthetic wastewater using Rosa damascena waste as a biosorbent: An insight into adsorption mechanisms, kinetics, and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Science*, 280, 119072. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119072>

- Chabaane, L., Tahiri, S., Albizane, A., Krati, M. El, Cervera, M. L., & de la Guardia, M. (2011). Immobilization of vegetable tannins on tannery chrome shavings and their use for the removal of hexavalent chromium from contaminated water. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 310–317. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2011.09.037>
- Cheng, C., Jia, M., Cui, L., Li, Y., Xu, L., & Jin, X. (2022). Adsorption of Cr(VI) ion on tannic acid/graphene oxide composite aerogel: kinetics, equilibrium, and thermodynamics studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(9), 3875–3885. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00899-4>
- Chu, K. H., & Hashim, M. A. (2007). Copper biosorption on immobilized seaweed biomass: Column breakthrough characteristics. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8), 928–932. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60153-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60153-3)
- Cuetocue Petins, M. M., Sarria Villa, R. A., Gallo Corredor, J. A., & Benítez Benitez, R. (2020). Optimización del proceso de obtención de un adsorbente natural a partir de corteza de pino. *Revista ION*, 33(2), 61–70. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020005>
- Cuetocue Petins, M. M., Sarria-Villa, R. A., Benítez Benítez, R., & Gallo Corredor, J. A. (2021). Chemical modified tannins from *Pinus patula* bark for selective biosorption of gold in aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106162. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106162>
- Cui, J., Wang, Z., Liu, F., Dai, P., Chen, R., & Zhou, H. (2013). Preparation of persimmon tannins immobilized on collagen adsorbent and research on its adsorption to Cr(VI). *Materials Science Forum*, 743–744, 523–530. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.743-744.523>
- Fei, Y., & Hu, Y. H. (2023). Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Chemosphere*, 335, 139077. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139077>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (2003). Sorption of dyes and copper ions onto biosorbents. *Process Biochemistry*, 38(7), 1047–1061. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00239-X](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00239-X)
- Kim, H., Kim, K., Chang, Y., Lee, S., & Yang, J. (2012). Heavy metal removal from aqueous solution by tannins immobilized on collagen. *Desalination and Water Treatment*, 48(1–3), 1–8. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.698517>
- Kim, Y., & Nakano, Y. (2005). Adsorption mechanism of palladium by redox within condensed-tannin gel. *Water Research*, 39(7), 1324–1330. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.12.036>
- Li, W., Tang, Y., Zeng, Y., Tong, Z., Liang, D., & Cui, W. (2012). Adsorption behavior of Cr(VI) ions on tannin-immobilized activated clay. *Chemical Engineering Journal*, 193, 88–95. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2012.03.084>
- Madala, S., Nadavala, S. K., Vudagandla, S., Boddu, V. M., & Abburi, K. (2017). Equilibrium, kinetics and thermodynamics of Cadmium (II) biosorption on to composite chitosan biosorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1883–S1893. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.017>
- Meethale Kunnambath, P., & Thirumalaisamy, S. (2015). Characterization and utilization of tannin extract for the selective adsorption of Ni (II) ions from water. *Journal of Chemistry*, 2015(1), 498359. <https://doi.org/10.1155/2015/498359>

- Netzahuatl, A. (2009). *Selección y caracterización de un biomaterial capaz de remover cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas* [Tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Institucional. <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/6210>
- Pérez Antolinez, L. L., Paz Astudillo, I. C., Sandoval Aldana, A. P., y Peñaloza Atuesta, G. C. (2020). Uso de cáscara de cacao (*Theobroma cacao*) para la remoción de cromo en solución acuosa. *Revista EIA*, 17(34), 1–13. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1393>
- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
- Rodríguez Yupanqui, M., & Quezada Alvarez, M. A. (2020). Remoción de cromo en efluente de curtiembre por consorcio de levaduras del género *Saccharomyces* y *Pichia*. *Ucv-Scientia*, 11(2), 81–91. <https://doi.org/10.18050/ucvs.v11i2.2587>
- Sadegh, N., Haddadi, H., Sadegh, F., & Asfaram, A. (2023). Recent advances and perspectives of tannin-based adsorbents for wastewater pollutants elimination: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 19, 100763. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100763>
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., & Gibello-Pérez, P. (2011). Adsorbent biopolymers from tannin extracts for water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 168(3), 1241–1247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.022>
- Schiewer, S., & Volesky, B. (2000). Biosorption processes for heavy metal removal. In D. R. Lovley (Ed.), *Environmental microbe-metal interactions* (pp. 329–362). ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555818098.ch14>
- Xu, Q., Wang, Y., Jin, L., Wang, Y., & Qin, M. (2017). Adsorption of Cu (II), Pb (II) and Cr(VI) from aqueous solutions using black wattle tannin-immobilized nanocellulose. *Journal of Hazardous Materials*, 339, 91–99. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.06.005>
- Yahya, M. D., Abubakar, H., Obayomi, K. S., Iyaka, Y. A., & Suleiman, B. (2020). Simultaneous and continuous biosorption of Cr and Cu (II) ions from industrial tannery effluent using almond shell in a fixed bed column. *Results in Engineering*, 6, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100113>
- Zhang, R., & Tian, Y. (2020). Characteristics of natural biopolymers and their derivative as sorbents for chromium adsorption: a review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00038-9>
- Zhang, X., Ma, J., Zou, B., Ran, L., Zhu, L., Zhang, H., Ye, Z., & Zhou, L. (2022). Synthesis of a novel bis Schiff base chelating resin for adsorption of heavy metal ions and catalytic reduction of 4-NP. *Reactive and Functional Polymers*, 180, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105409>

