

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

TESIS:

**BIOFILTRO A BASE DE CÁSCARA DE HUEVO Y CÁLICES DE
Physalis peruviana L. PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA CON
METALES PESADOS**

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Presentada por:

Mtr. MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN

Asesor:

Dr. GLICERIO EDUARDO TORRES CARRANZA

Cajamarca, Perú

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Magda Rosa Velásquez Marín
DNI: 41400089

Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Doctorado en Ciencias. Mención: Gestión Ambiental y Recursos Naturales
2. Asesor: Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
3. Grado académico o título profesional
O Bachiller n Título profesional n Segunda especialidad
n Maestro X Doctor
4. Tipo de Investigación:

X Tesis n Trabajo de investigación O Trabajo de suficiencia profesional
n Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:

Biofiltro a base de cáscara de huevo y cálices de *Physalis peru lana* L. para el tratamiento de agua con metales pesados
6. Fecha de evaluación: **28/08/2025**
7. Software antiplagio: X TURNITIN ci URKUND (OURIGINAL) c*Q
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 18 %
9. Código Documento: **3117:487168646**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
X APROBADO ci PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **28/08/2025**

Firma y/o Sello
Emisor Constancia



Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
DNI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2024 BY
MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERU



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

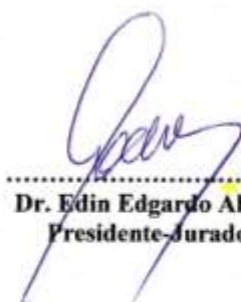
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

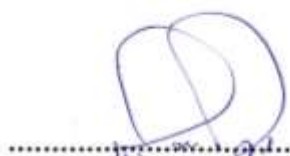
Siendo las 17 horas, del día 21 de noviembre del año dos mil veinticuatro, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. EDIN EDGARDO ALVA PLASENCIA**, **Dr. WILFREDO POMA ROJAS**, **Dr. AUGUSTO HUGO MOSQUEIRA ESTRAYER** y en calidad de Asesor, el **Dr. GLICERIO EDUARDO TORRES CARRANZA**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **"BIOFILTRO A BASE DE CÁSCARA DE HUEVO Y CÁLCICES DE *Physalis peruviana* L. PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA CON METALES PESADOS"** presentada por la Máster Universitario en Ingeniería Ambiental en la Especialidad de Dirección de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales **MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobar con la calificación de excelente (17) la mencionada Tesis; en tal virtud, la Máster Universitario en Ingeniería Ambiental en la Especialidad de Dirección de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales **MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN**, está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que la acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS, MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias.

Siendo las 18h10' horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
Asesor


.....
Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
Presidente Jurado Evaluador


.....
Dr. Wilfredo Poma Rojas
Jurado Evaluador


.....
Dr. Augusto Hugo Mosqueira Estrayer
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

A mi madre, por ser una mujer extraordinaria y el pilar que siempre respalda cada uno de mis sueños.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, el Dr. Eduardo Torres Carranza, quien me apoyo en la elaboración de mi tesis con su conocimiento.

“Si no conozco una cosa, la investigaré.”

- Louis Pasteur

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	4
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.2. Bases teóricas.....	9
2.2. Definición de términos básicos.....	31
CAPÍTULO III	34
MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1. Ubicación de la zona de estudio	34
3.2. Características climáticas	35
3.3. Características geomorfológicas y geológicas.....	35
3.4. Características hidrológicas.....	35
3.5. Equipos y Materiales.....	35
3.6. Metodología	37
CAPÍTULO IV.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS Y APENDICES	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa	10
Tabla 2 Análisis físico químico de la cáscara de huevo	14
Tabla 3 Fuentes de metales pesados	16
Tabla 4 Metales pesados, ECAs, LMPs y sus efectos en la salud humana.....	17
Tabla 5 Tipo de tratamiento de metales pesados, ventajas y desventajas.....	18
Tabla 6 Clasificación de la biomasa lignocelulósica	19
Tabla 7 Tipo de biosorbente según su origen y sus características	20
Tabla 8 Características de los mecanismos de biosorción.....	21
Tabla 9 Comparación de porcentaje de remoción de distintos biorresiduos.....	22
Tabla 10 Obtención y preparación de los biofiltros.....	38
Tabla 11 Descripción del biofiltro elaborado con cáscara de huevo y <i>Physalis peruviana</i> L.	39
Tabla 12 Eficiencia de remoción (%R) de los metales pesados en los biofiltros en función del tiempo.....	42
Tabla 13 Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías de la eficiencia de los biofiltros en la remoción de metales pesados.....	45
Tabla 14 Resultado de la prueba post-hoc de Tukey HSD para la diferencia de eficiencia entre los biofiltros	46
Tabla 15 Vida útil del lecho (t_R) para cada biofiltro en la remoción de metales pesados.....	51
Tabla 16 Parámetros del modelo de Thomas y del modelo dosis respuesta modificado para la biosorción de metales pesados.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L.	12
Figura 2 Cáscara de huevo	13
Figura 3 Curva de ruptura y saturación de la columna	28
Figura 4 Mapa de ubicación de la ciudad de Cajamarca	34
Figura 5 Procedimiento de la Investigación	37
Figura 6 Esquema de los biofiltros	39
Figura 7 Interacción de los biofiltros con los metales pesados con puntos individuales	44
Figura 8 Curva de ruptura para el biofiltro de cáscara de huevo 250 μm	48
Figura 9 Curva de ruptura para el biofiltro de cáscara de huevo 425 μm	48
Figura 10 Curva de ruptura para el biofiltro de cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 μm	49
Figura 11 Curva de ruptura para el biofiltro de cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 μm	49
Figura 12 Espectro FTIR-ATR de la cáscara de huevo de gallina antes de la adsorción de iones metálicos ..	56
Figura 13 Espectro FTIR-ATR de la cáscara de huevo de gallina después de la adsorción de iones metálicos	57
Figura 14 Espectro FTIR-ATR de los cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. antes de la adsorción de iones metálicos.....	59
Figura 15 Espectro FTIR-ATR de los cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. después de la adsorción de iones metálicos.....	59
Figura 16 Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. lavados y secados	77
Figura 17 Cáscara de huevo de gallina molida.....	77
Figura 18 Tamizaje de cáscara de huevo de gallina.....	78
Figura 19 Tamizaje de cálices de <i>Physalis peruviana</i> L.....	78
Figura 20 Biofiltros a base de cáscara de huevo de gallina y cálices de <i>Physalis peruviana</i> L.....	79

LISTA DE ABREVIACIONES

As	: Arsénico.
ATR	: Reflexión Total Atenuada
Cd	: Cadmio.
CO ₂	: Dióxido de carbono.
Cr	: Cromo.
EPP	: Equipo de Protección Personal.
ECA	: Estándar de Calidad Ambiental.
F	: Flúor.
FTIR	: Transformada Infrarroja de Fourier
L	: Litro.
LCM	: Límite de Cuantificación del Método
LMP	: Límites Máximos Permisibles.
mg/L	: Miligramo por litro
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego.
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
OMS	: Organización Mundial de la Salud.
Pb	: Plomo.
PTAR	: Planta de tratamiento de aguas residuales.
pH	: Unidad de pH.
SUNASS	: Superintendencia Nacional de Servicios y Saneamiento.
t	: Tiempo.
t _s	: Tiempo de saturación.
t _r	: Tiempo de ruptura.

RESUMEN

Este estudio evaluó la eficiencia de biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con metales pesados. Para el experimento se utilizó agua potable contaminada a la que se incorporó una concentración controlada de 8,5 mg/l de cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr) y arsénico (As). Los biofiltros fueron elaborados a partir de biomasa lavada, secada y tamizada en granulometrías de 250 y 425 μm . Se operaron en un sistema de flujo continuo por gravedad durante 430 min. Los resultados mostraron que la cáscara de huevo de 250 μm alcanzó eficiencias de 99,9 % para el Pb, 64,9 % para el Cd y 87,1 % para el Cr, sin alcanzar el punto de ruptura durante la operación. Los biofiltros de cálices de *Physalis peruviana* L. lograron eficiencias menores al 46 %. Para ambos materiales la remoción de As fue limitada. En el análisis cinético, el modelo de dosis respuesta modificado tuvo un ajuste superior con respecto al modelo de Thomas, con un coeficiente de determinación (R^2) > 0,99 en la mayoría de los casos. La caracterización por espectroscopia FTIR, confirmó la teoría de que en la cáscara de huevo participan de la remoción los carbonatos (CO_3^{2-} , 1402 y 871 cm^{-1}) y enlaces C–O (1031 cm^{-1}), mientras que en los cálices se observaron principalmente los grupos –OH (3307 cm^{-1}), C=O (1722 cm^{-1}) y C–O (1010 cm^{-1}). Estos grupos funcionales participaron activamente en mecanismos de intercambio iónico y complejación superficial. En conclusión, ambos materiales califican como biosorbentes, no obstante, la cáscara de huevo muestra una eficiencia superior, destacándolo como un material sostenible para el tratamiento de agua con metales pesados.

Palabras claves: Biofiltro, metales pesados, cálices de *Physalis peruviana* L., cáscara de huevo.

ABSTRACT

This study evaluated the efficiency of biofilters made from chicken eggshell and calyces of *Physalis peruviana* L. in the treatment of water with heavy metals. For the experiment, drinking water was contaminated by incorporating a controlled concentration of 8.5 mg/L of cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), and arsenic (As). The biofilters were prepared from biomass that was washed, dried, and sieved to particle sizes of 250 and 425 μm . They were operated in a continuous gravity flow system for 430 min. The results showed that the 250 μm eggshell achieved efficiencies of 99.9% for Pb, 64.9% for Cd, and 87.1% for Cr, without reaching the breakthrough point during operation. The biofilters made from *Physalis peruviana* L. calyces achieved efficiencies below 46%. For both materials, the removal of As was limited. In the kinetic analysis, the modified dose–response model showed a superior fit compared to the Thomas model, with a determination coefficient (R^2) > 0.99 in most cases. Characterization by FTIR spectroscopy confirmed the theory that, in eggshell, carbonates (CO_3^{2-} , 1402 and 871 cm^{-1}) and C–O bonds (1031 cm^{-1}) participate in the removal, while in the calyces the main groups observed were –OH (3307 cm^{-1}), C=O (1722 cm^{-1}), and C–O (1010 cm^{-1}). These functional groups actively participated in ion-exchange and surface complexation mechanisms. In conclusion, both materials qualify as biosorbents; however, eggshell shows superior efficiency, highlighting it as a sustainable material for the treatment of water with heavy metals.

Key words: Biofilter, heavy metals, calyces of *Physalis peruviana* L., eggshell.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua a nivel mundial se encuentra en riesgo por la contaminación de metales pesados, problemática que enfrentan las plantas de tratamiento de agua potable para garantizar la calidad de este recurso (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). Abordar esta situación es importante, ya que el agua dulce disponible en ríos y lagos representa el 0,01% del total (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2021).

Esta contaminación por metales pesados puede originarse por procesos naturales, como la erosión o meteorización de los elementos presentes en las rocas (Reyes et al., 2016) o en actividades antropogénicas como la industria, minería y agricultura. De estas, la agricultura representa una actividad importante en el abastecimiento de alimentos y requiere grandes volúmenes de agua, que en algunos casos contiene metales. Estos elementos pueden ser absorbidos por las plantas a través de sus raíces, mediante el proceso de traslocación, comprometiendo la salubridad de los productos agrícolas (Prieto et al., 2009).

Londoño et al. (2016) señalan que la salud humana puede verse comprometida incluso si el agua contiene metales pesados en bajas concentraciones, afectando especialmente a los riñones, pulmones, piel y otros órganos. Este problema también afecta a los ecosistemas y con ello a la cadena alimentaria. Existen diferentes técnicas para remover metales pesados del agua, como el intercambio iónico y la precipitación química; sin embargo, estos tratamientos son costosos y necesitan de personal especializado para su aplicación (Caviedes et al., 2015).

En este contexto, los residuos de biomasa están siendo estudiados como una alternativa viable para la remoción de metales pesados, colorantes, compuestos orgánicos emergentes,

pesticidas (Valladares et al., 2016) e hidrocarburos (Rincones et al., 2015). En el Perú el 56% de los residuos generados son orgánicos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2023); y utilizados generalmente en la producción compost y humus; no obstante, podrían tener otras utilidades potenciales como bioetanol (Baray et al., 2019) o biofiltros (Dávila et al., 2017).

El tratamiento de agua convencional prioriza la remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Sin embargo, en algunas comunidades rurales del Perú, el agua contiene contaminantes generados por actividades mineras, industriales, agrícolas, o por condiciones geológicas de la zona. Esta situación, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar técnicas que permitan remover metales pesados, que sean fáciles de operar y de bajo costo. Por esta razón, proponemos utilizar residuos de biomasa inerte para la remoción de dichos contaminantes. Frente a esta problemática, se formuló la siguiente pregunta de investigación ¿Es eficiente el Biofiltro a base de cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con metales pesados?

A fin de dar respuesta a esta pregunta se plantean los siguientes objetivos.

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con metales pesados.

Objetivos específicos

Modelar el rendimiento cinético y la durabilidad de los biofiltros de lecho fijo elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. para el tratamiento de agua contaminada con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As).

Analizar los mecanismos de adsorción de biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. para el tratamiento de agua contaminada con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As), utilizando los modelos matemáticos de Thomas y de dosis respuesta modificada.

Analizar la composición química y los grupos funcionales de los residuos de cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. mediante espectroscopía infrarroja para identificar sitios de adsorción potenciales de metales pesados.

Estos biorresiduos no han sido ampliamente estudiados, por lo que se considera que su evaluación es fundamental para encontrar nuevos materiales filtrantes, con características de eficiencia, facilidad de manipulación y disponibilidad para su uso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Asma et al. (2022), en su investigación titulada *Síntesis y aplicación de biocarbón de cáscara de huevo para la eliminación de arsénico V de soluciones acuosas*. Estudió la eficiencia del biocarbón en el tratamiento de agua contaminada con arsénico. En el experimento se utilizó 0,1 g/l, 0,5 g/l, 0,7 g/l, 0,8 g/l, 0,9 g/l y 1 g/l de dosis de biocarbón, con tiempos de contacto de 2 horas, variándose el pH entre 3 y 8 unidades y con concentraciones entre 0,01 y 10 mg/L de arsénico. El resultado, confirmó la hipótesis alterna de alta eficiencia del biocarbón en la adsorción de arsénico.

Qiong et al. (2020) en su investigación titulada *Removal of hexavalent chromium in aquatic solutions by pomelo peel*, Tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la cáscara de pomelo pura y cáscara de pomelo modificada con cloruro de hierro III (FeCl₃) en la reducción de cromo hexavalente Cr(VI) en soluciones acuosas. En el experimento se utilizó la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS). Los resultados mostraron que la cáscara de pomelo modificada tuvo la capacidad de adsorción de 21,55 mg/g Cromo VI, en comparación con la cáscara de pomelo sin modificar cuya adsorción fue de 0,57 mg/g.

Vijay y Rajesh (2021) en su investigación titulada *Aplicación de residuos de cáscara de huevo para la adsorción de iones Cd (II) y Pb (II) para proteger el medio*

ambiente: estudios de equilibrio, cinética y adsorción. Estudió la eficiencia de la cáscara de huevo de gallina calcinada en la biosorción de cadmio (Cd) y plomo (Pb). En el experimento se usó entre 50 y 250 mg de adsorbente, y se varió el pH entre 2 y 7. Los resultados indican una eficiencia del 98 % en la adsorción, con un pH óptimo de 5 y una dosis de 200 mg de adsorbente y un tiempo de contacto de 129 min.

Annane et al. (2021) en su investigación titulada *Eficiencia de la cáscara de huevo como adsorbente de bajo costo para la eliminación de cadmio: estudios cinéticos e isotérmicos.* Evaluó la eficiencia de la cáscara de huevo en la adsorción de cadmio. En el experimento se trabajó con diferentes valores de pH y concentraciones del adsorbente, se usó espectroscopía infrarroja, método Brunauer-Emmett-Teller (BET), análisis termogravimétrico (TGA) y difracción de rayos X (DRX). Los resultados indicaron que la mayor eficiencia de adsorción fue de 217,4 mg/g a los 10 min, con una dosis de adsorbente de 0,8 g/l y un pH de 5.

Mashangwa et al. (2017) en su investigación titulada *Eficacia de la cáscara de huevo como adsorbente de bajo costo para el tratamiento de efluentes cargados de metales,* estudió la eficacia de la cáscara de huevo en la reducción de zinc, plomo, níquel, arsénico, cromo, hierro, antimonio y telurio. El experimento se realizó con el efluente de un drenaje ácido de mina, se usó 7 g de biosorbente a base de cáscara de huevo de gallina en un tiempo de contacto de 360 min. Los resultados mostraron una eficiencia en la adsorción de 97 % para el plomo, 95 % para el cobre, 94 % para el níquel, 80 % para el zinc, para el arsénico y cromo se obtuvieron resultados por encima del 75 %. Se concluye que la cáscara de huevo es una opción eficiente para la remoción de metales pesados en efluentes.

Makuchowska (2019), en su investigación titulada *Uso de las cáscaras de huevo en la eliminación de metales pesados de aguas residuales la cinética y eficiencia del proceso*. Evaluó la eficiencia de la cáscara de huevo en la reducción de iones de cobre (Cu), níquel (Ni) y cadmio (Cd). El experimento se llevó a cabo con cáscara de huevo de granulometría de 100 μm , a un pH entre 4,6 y 5,4, se emplearon muestras de agua mineral contaminada deliberadamente; el proceso de eliminación de metales se llevó a cabo utilizando 500 rpm, durante 3 horas, a temperatura ambiente. Los resultados mostraron que la cáscara de huevo es eficiente en la reducción de metales pesados de efluentes.

Hee-Jeong (2019), en su investigación titulada *Evaluación de la cinética de adsorción, el equilibrio y la termodinámica para la eliminación de Pb(II) utilizando un adsorbente híbrido de bajo costo para residuos biológicos, cáscara de huevo/café molido/sericita*. Comparó materiales de bajo costo en la reducción de plomo en agua contaminada. El experimento se realizó en una solución acuosa y se utilizó espectroscopía infrarroja para identificar los grupos funcionales. Los resultados mostraron que los grupos OH destacaban como estructuras favorables para la reducción de metales pesados y que el adsorbente híbrido es favorable en la adsorción de plomo.

Kayranli (2022) en su investigación titulada *Mecanismos de eliminación de cadmio de una solución acuosa mediante el uso de lignocelulosas recicladas*. Evaluó la eficiencia de tres residuos orgánicos: pistacho, cacahuete y almendra, en la eliminación de iones de cadmio (Cd^{2+}) de efluentes contaminados. Durante el proceso se evaluó el tiempo de contacto, la dosis del sorbente, el pH y la concentración de cadmio (Cd^{2+}). Se emplearon los modelos de adsorción de Langmuir y la cinética de

segundo orden. Los resultados mostraron que el pistacho tiene la capacidad de sorción de 51,28 mg/g, el cacahuete de 62,11 mg/g y la almendra de 78,74 mg/g; además la espectroscopia infrarroja (FTIR) reveló que las lignocelulosas presentan superficies porosas y ásperas con numerosos sitios activos, facilitando la eliminación de iones metálicos a través de interacción electrostática, intercambio iónico, complejación y adsorción física.

Vera et al. (2018) en su trabajo *Modelado en columna de lecho fijo para la biosorción de Cd^{2+} y Pb^{2+} con cáscara de cacao*, analizaron la biosorción de Pb^{+2} y Cd^{+2} , a través de biomasa. En su metodología utilizó cáscara de cacao como medio filtrante en columnas de lecho fijo, donde se variaron el diámetro y altura de la columna, granulometría del material adsorbente y el volumen del efluente. Los resultados indican porcentajes de remoción de 91 % y 90 % para Pb^{+2} y Cd^{+2} respectivamente en sistema de monocomponentes; y en sistemas de bicomponentes los porcentajes de remoción fueron de 88 % y 90 % para Pb^{+2} y Cd^{+2} respectivamente.

Espinosa et al. (2020) estudió la *Adsorción de Cd (II) y Pb (II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (Byrsonima crassifolia)*, estableciendo como objetivo evaluar la capacidad de adsorción de Cd (II) y Pb (II) utilizando bioresiduos. En su metodología consideró estudiar la variación de pH en la eficiencia de adsorción, utilizándose isothermas de Langmuir, Freundlich y Prausnitz-Radke. De los resultados, se obtuvo que una mejor remoción ocurre cuando se incrementa a pH 8 para el Cd, alcanzándose una adsorción de 84%; con respecto al Pb se obtuvo una mejor remoción a pH 5, alcanzando una remoción de 82%.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Salas y Effio (2020) estudiaron el *Tiempo de Contacto y pH de la cáscara de granadilla (Passiflora ligularis L.) en la biosorción de Zinc en aguas contaminadas del Río Grande*, con el objetivo evaluar la influencia del pH y el tiempo de contacto en la adsorción de zinc utilizando cáscara de granadilla. Para el experimento se usó 0,5 kg de cáscara de granadilla, una malla N°18 para establecer la granulometría de la cáscara granadilla y agua contaminada del río Grande. El experimento se realizó en tiempos de 4, 8, 12, 16 y 24 min, a pH 6,8 y 10. Los resultados mostraron que la máxima adsorción fue de 119,20 mg de Zn/g con un pH de 10, en un tiempo de 24 min.

Alegre y Gutiérrez (2021) investigaron acerca de la *Remoción de cadmio y plomo en un Efluente Minero de Ticapampa-Recuay, Ancash con biomasa seca de Serratia marcescens M8a-2t*, con el objetivo de remover el cadmio y plomo presentes en una muestra de efluente minero. La metodología aplicada fue de superficie respuesta, con variabilidad de pH de 2, 3 y 4 y con concentración del material adsorbente de 1, 2 y 3 mg/l, utilizando tiempos de adsorción de 15, 30 y 45 min. El mejor porcentaje de remoción se obtuvo a los 30 min de tratamiento, con una remoción de 97,11 % para cadmio y 98,63 % para plomo utilizando un pH de 4 y 2 mg/ml de biorresiduos y un pH de 4 y 1 mg/ml de biomasa respectivamente.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Biomasa

La biomasa se caracteriza por estar conformada de compuestos químicos a base de lignina, hemicelulosa y celulosa, los cuales intervienen en la adsorción de metales pesados, tintes, pesticidas y contaminantes emergentes (Payán, 2016; Dávila et al., 2016; Valladares et al., 2016). Su nivel de eficiencia depende de parámetros como el pH, la granulometría, la cantidad de biomasa, el caudal, la concentración inicial, etc. (Tejada et al., 2017). Estos materiales adsorbentes pueden ser utilizados en sistemas de tipo batch o en columnas de lecho fijo (Vizcaíno et al., 2017).

En los últimos años se han realizado diversos experimentos de biosorción de metales pesados utilizando distintos tipos de biorresiduos, tales como hojas y tallos de *Eichhornia crassipes* (Vizcaíno et al., 2017), *Byrsonima crassifolia* (hueso de nanche) (Espinosa et al., 2020), residuos agrícolas (Broche et al., 2018), de frutas (Romero, 2018) e industriales (Lavado y Oré, 2016). Estos biorresiduos destacan por su bajo costo, facilidad de operación y potencial de regeneración (Ronda et al., citado en Lavado y Oré, 2016). Además, tienen la posibilidad de ser modificados químicamente con hidróxido de sodio para incrementar su nivel de adsorción (Oré et al., 2015). Las ventajas y desventajas del uso de biomasa se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Ventajas y desventajas de la utilización de biomasa

Ventajas	Desventajas
Es un sistema ideal para comunidades rurales o lugares alejados que carecen de sistemas de distribución de agua potable.	El pH limita la adsorción de determinados parámetros.
Es adecuado para efluentes contaminados con metales pesados.	
No requieren energía para que el sistema opere.	Los sólidos suspendidos pueden afectar el proceso
No requiere de personal especializado.	Los residuos del biofiltro constituyen residuos tóxicos en algunos casos
Los materiales son accesibles y de bajo costo.	
Se pueden seleccionar diferentes tipos de biomasa.	
Regeneración de los adsorbentes.	
Rendimiento óptimo que pueden competir con otros tipos de tratamientos.	
Es aplicable a temperaturas entre 4 °C a 90°C y rangos de pH entre 3 y 9.	

Nota. Datos tomados de Marín y Arriojas (2020), Villa et al. (2018), Tejada et al. (2015), Brazesh et al. (2021), Duany et al. (2022).

2.1.1. Selección de la biomasa

Para seleccionar el material filtrante, se consideran los residuos generados en la localidad y que estén disponibles. Según la revista Agraria.pe (2023), la producción de huevo de gallina en el Perú alcanzó aproximadamente 503 080 mil toneladas en 2018. Con respecto a los cálices de *Physalis peruviana* L., en el distrito de Cajamarca existen dos plantas procesadoras que elaboran frutos secos y

mermeladas de este producto, donde los cálices son residuos disponibles para usarlos como biosorbentes.

La selección de la biomasa filtrante depende del tipo de contaminante que se desee reducir, ya que cada biomasa tiene grupos funcionales específicos. Si se va a tratar agua con fines de potabilidad, se debe verificar que los residuos orgánicos filtrantes no hayan estado expuestos a contaminantes como herbicidas, insecticidas u otros contaminantes. Asimismo, es importante verificar que sus componentes naturales no sean tóxicos ni representen riesgos para la salud humana.

2.1.1.1. Cálices de *Physalis peruviana* L.

Planta herbácea perenne y semiarbustiva originaria de los Andes peruanos, conocida popularmente con “aguaymanto” o “uchuva”. Sus frutos son de forma esférica y de color naranja, miden de 1,5 a 2 cm de diámetro, protegidos por el cáliz de textura papirácea que representa aproximadamente el 5% del peso de la fruta fresca (Añibarro et al., 2025).

Esta fruta es cultivada en la zona andina del Perú y destaca en la lista de especies más conocidas, junto con el capulí, la lúcuma y la chirimoya. Es una especie que requiere de poca fertilización, y puede cultivarse a diferentes altitudes, desde el nivel del mar hasta los 3 300 m s.n.m. (Gobierno Regional de Cajamarca, 2025).

La *Physalis peruviana* L. ha sido declarada “Patrimonio Natural de la Nación” por Ley N°28447. Este fruto tiene un alto valor nutricional, debido a su contenido de vitamina A, C y B, fósforo, fibra dietética, alto nivel de

fructuosa, 15 % de sólidos solubles, calcio, carotenos, tiamina, riboflavina, ácido ascórbico, entre otros compuestos (BIOPAT/PERU, 2015).

El cáliz de *Physalis peruviana* L. contiene metabolitos como saponinas, flavonoides, lípidos, fenoles, taninos, triterpenos y esteroides (Salmon et al., 2015; Vallejo et al., 2019). La Figura 1 presenta la fotografía de los cálices de *Physalis peruviana* L.

Figura 1

Cálices de Physalis peruviana L.



2.1.1.2. Cáscara de huevo de gallina

Existen diferentes tipos de cáscara de huevo, los más comunes son los de gallina, pato y codorniz. De estos, los huevos de gallina son los más consumidos en el mundo, con un 92% del total (Instituto de Estudios del Huevo, 2022).

La cáscara de huevo de gallina representa aproximadamente el 9% del peso del huevo. El color depende de los pigmentos ovoporfirinas, cuya

concentración varía de acuerdo con la raza del ave. Por ejemplo, la raza Leghorn se caracteriza por producir huevos de color blanco, la raza Prat por producir huevos de color crema y las razas de plumaje oscuro por producir huevos de color marrón. Además, las cáscaras se caracterizan por presentar superficies porosas (Instituto de Estudios del Huevo, 2022). La Figura 2 muestra la fotografía de la cáscara de huevo de gallina.

Figura 2

Cáscara de huevo



2.1.1.3. Estudios de toxicidad de la biomasa

- ***Physalis peruviana* L.**

Para la elaboración del biofiltro con cálices de *Physalis peruviana* L. se realizó una revisión bibliográfica sobre su toxicidad, los estudios consultados indican baja toxicidad en larvas del tercer estadio, así como sus propiedades anticancerígenas, antimicrobianas y antiinflamatorias (Huamán et al., 2020), información que respalda el uso seguro de este material en biofiltración de agua destinada al consumo humano.

- **Cáscara de huevo de gallina**

La cáscara de huevo de gallina está compuesta por calcio y otros elementos no tóxicos, lo que permite su uso en la fortificación de alimentos (Pérez et al., 2018). Sin embargo, debido a la falta de implementación de programas de segregación y recolección en la fuente, su aprovechamiento se limita al compostaje casero o al uso como abono para plantas. En la Tabla 2 se presenta sus componentes fisicoquímicos.

Tabla 2

Análisis físico químico de la cáscara de huevo

Parámetros	%
Carbonato cálcico	94%
Carbonato magnésico	1%
Fosfato Cálcico	1%
Materia orgánica	4% de proteína

Nota. Tomado del Instituto de Estudios del Huevo (2022).

2.1.1.4. Producción y comercio

- ***Physalis peruviana* L**

La producción de *Physalis peruviana* L. en el 2020 fue de 1 277 t, en Huánuco, 176 t en Cajamarca y 48 t en Junín. En la provincia de Cajamarca existen empresas dedicadas a la transformación del fruto en productos como mermeladas y pasas (Quispe, 2023). Los

cálices, al ser considerados residuos, se encuentran disponibles para su aprovechamiento.

- **Cáscara de huevo**

En el 2023, la producción anual de huevos de gallina en el Perú alcanzó 503 080 t (Agraria.pe, 2023). En el distrito de Cajamarca los negocios que utilizan importantes cantidades de huevo son las panaderías y los restaurantes, lo que genera condiciones favorables para implementar programas de recolección selectiva, destinados a la reutilización de este residuo, como se plantea en la presente investigación.

2.1.2. Fuentes e impacto de los metales pesados en la salud humana

Los metales pesados se encuentran de forma natural en la corteza terrestre, y mediante procesos como la erosión, pueden entrar en contacto con el agua, el suelo, el aire y la cadena alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019). Las actividades industriales, mineras y agrícolas también constituyen fuentes importantes de contaminación (Londoño et al., 2016). En la siguiente tabla se presentan las principales fuentes naturales y antrópicas de metales pesados.

Tabla 3*Fuentes de metales pesados*

Metal pesado	Fuente naturales	Fuentes Antrópicas
	Sulfuros minerales de zinc y cobre, carbonatos.	Manufactura metálica, minería y fundición, industria (baterías, plástico, microelectrónica), residuos metálicos, lodos de PTAR, fertilizantes.
Cadmio (Cd)	Forma parte de las rosas y suelo de manera natural y se liberan al ambiente unas 25 000 t.	Se utilizan en la elaboración de pilas, en la industria del acero, del plástico y por consumo de tabaco, productos agrícolas, etc.
Cromo (Cr)	Óxido de cromo III, cromita (FeCr_2O). Se encuentra en la corteza terrestre.	Manufactura metálica, refinería, industria (plástico, pirometalurgia), tratamiento de madera.
Plomo (Pb)	Galena	Refinería, Minería, fundición, industria (hierro, acero y pintura), fontanería de plomo, baterías, plaguicidas, lodos de PTAR, escombreras.
Arsénico (As)	Fuentes geotérmicas, gases volcánicos, sulfuros minerales (Arsenopirita), arseniatos metálicos y arseniuros.	Fundición, industria pirometalúrgica, plaguicidas, conservación de madera, escombreras metálicas, combustible fósil, vertederos de residuos. Etc. En la fabricación de semiconductores, láseres y transmisores

Nota. Datos adaptados de *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals* (Adriano, 2001).

Los principales metales pesados no biodegradables son el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el selenio (Se), el arsénico (As), el cobalto (Co), el níquel (Ni), el cromo (Cr), el talio (Tl), el zinc (Zn), el cadmio (Cd) y el cobre (Cu). Estos elementos son tóxicos para los seres humanos, los animales y las plantas, incluso a bajas concentraciones, debido a sus características de persistencia, bioacumulación y biomagnificación (Tejada et al., 2015). En la Tabla 4 se presentan los metales pesados más importantes, sus estándares de calidad ambiental, sus límites máximos permisibles y sus efectos en la salud humana.

Tabla 4*Metales pesados, ECAs, LMPs y sus efectos en la salud humana*

Parámetro	ECA ¹ (mg/L) DS N°004-2017- MINAM. Categoría 3.		LMP ² (mg/L) Agua para Consumo Humano	LMP ³ (mg/L) Efluentes líquidos de actividades Minero- Metalúrgicas.	LMP ⁴ (mg/L) Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburos	Efectos en la salud humana*-
	Riego de vegetales	Bebida de animales	DS N°031- 2010-SA.	D.S. N°010- 2010- MINAM.	D.S. N° 037- 2008-PCM.	Organización Mundial de la Salud (OMS), 2011-2016.
Cadmio (Cd)	0.01	0.05	0.003	0.05	0.1	Se acumula en los riñones e hígado generando daños irreparables. Su semivida en el cuerpo humano es de 10 a 35 años.
Arsénic o (As)	0.1	0.2	0.010	0.1	0.2	Causa arsenicosis y cáncer en varios órganos, especialmente en la piel, los pulmones y la vejiga.
Cromo (Cr)	0.1	1.0	0.050	-	0.5	Tiene efectos de carcinogenicidad. Es tóxico y se acumula en los huesos, dientes, órganos y tejidos.
Plomo (Pb)	0.05	0.05	0.010	0.2	0.1	Obstruye la asimilación del calcio y la vitamina D. Afecta al sistema nervioso central, tiene efectos neurológicos.

Nota. “-“ indica ausencia de valor.

2.1.3. Métodos de tratamiento de metales pesados en agua

Los metales pesados impactan negativamente en la salud humana y el bienestar de los ecosistemas. Para hacer frente a esta situación, se están investigando métodos alternativos para el tratamiento de aguas que permitan la remoción de estos elementos. La elección del método más adecuado depende sus ventajas técnicas y económicas. En la

Tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de los principales métodos utilizados para el tratamiento de agua contaminadas con metales pesados.

Tabla 5

Tipo de tratamiento de metales pesados, ventajas y desventajas

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Intercambio iónico	Remoción rápida y eficiente	Costosos y altamente sensibles al pH
Precipitación química	Proceso eficiente	Genera gran cantidad de lodos.
Coagulación-floculación	Los lodos tienen buena sedimentación y facilidad de deshidratación	Requiere una gran cantidad de químicos y genera lodos. Presencia de solidos suspendidos en el efluente.
Filtración por membrana	Genera poca cantidad de desechos sólidos, mínimo uso de químicos	El costo inicial y el mantenimiento es costoso
Flotación	Remueve pequeñas partículas y bajo tiempo de retención	El costo inicial y el mantenimiento son elevados. Requiere efluente con altas concentraciones de metales pesados
Adsorción	Flexibilidad de diseño y regeneración de adsorbentes por desorción. La eficiencia depende del adsorbente	Alto costo de inversión, operación y mantenimiento.

Fuente: Sánchez et al. (2020).

2.1.4. Biosorción

2.1.4.1. Definición

El prefijo “Bio” hace referencia al “organismo biológico”, mientras que sorción es el proceso que se lleva a cabo cuando la adsorción y absorción suceden al mismo tiempo (Brazesh et al., 2021; Tejada et al., 2015). Durante

este proceso de tratamiento interactúan diversos mecanismos, como la complejación, el intercambio iónico y la precipitación (Liu et al., 2021).

La eficacia del biosorbente para retener sustancias en su superficie depende de la afinidad de los grupos funcionales (carboxilos, hidroxilos, fosfatos, etc.) con los contaminantes presentes en el agua (Broche et al., 2018; Liu et al, 2021; Brazesh et al., 2021). Las investigaciones indican que las biomásas con mejores cualidades de biosorción presentan grupos funcionales como aminas, amidas, carbonilos, carboxilos e hidroxilos. Estas características suelen encontrarse en los materiales filtrantes de origen lignocelulósico (Oré et al., 2015). La Tabla 6 muestra su clasificación.

Tabla 6

Clasificación de la biomasa lignocelulósica

Tipo de residuo	Ejemplo
Residuos agrícolas	Bagazo de caña de azúcar, bagazo de maíz, pajas de trigo, arroz y cebada.
Maderas duras	Júcaro, guayacán, caguairán, yamaquey.
Maderas blandas	Pino, picea.
Residuos celulósicos	Papel periódico, lodos de papel reciclado, residuos de papel de oficina.
Biomasa herbácea	Alfalfa, alpiste, limoncillo.
Residuos sólidos urbanos (RSU)	Cáscaras de huevo, cáscaras de fruta, etc.

Nota. Adaptado de Almenares et al. (2011).

Espinosa et al. (2020) señalan que la sorción de los elementos contaminantes en un medio acuoso depende de la presencia de determinados grupos funcionales. Con respecto a la remoción de metales pesados, los más

eficientes son los grupos carboxilos (R-COOH), hidróxidos (-OH) y carbonilos (C=O). Por su parte, Dávila et al. (2017) indican que un biorresiduo con alto contenido de lignina presenta mayor capacidad de adsorción de estos compuestos. En este contexto, se recomienda realizar un análisis de espectroscopía infrarroja para identificar sus grupos funcionales.

Asimismo, para incrementar la cantidad de sitios activos disponibles y mejorar la eficiencia de la adsorción de la biomasa, esta puede modificarse químicamente mediante tratamientos con hidróxido de sodio (NaOH), cloruro de calcio (CaCl₂) o por carboxilación con ácido cítrico (Vizcaíno y Fuentes, 2015; Tejada et al., 2016).

2.1.4.2. Tipos de biosorbente según su origen

La tabla 7 muestra los tipos de biomasa según su origen y sus respectivas características.

Tabla 7

Tipo de biosorbente según su origen y sus características

Tipos de biosorbente	Características
Biomasa microbial	Conformado por algas, bacterias, levaduras y hongos
Biomasa inerte	Conformada por vegetales inertes (residuos agrícolas, industriales, domésticos, naturales)

Nota. Tomado de Tejada et al. (2014).

Actualmente, los materiales no convencionales son objeto de investigación debido a su eficiencia y bajo costo en la remoción de metales pesados. Para el proceso de biosorción se emplean diversas especies vegetales,

incluyendo todos sus componentes como hojas, tallo, semilla, fruto, etc.
(Valladares et al., 2016)

2.1.4.3. Mecanismos de biosorción

Los mecanismos de biosorción comprenden la complejación, la fisisorción, el intercambio iónico, la quimiosorción y la precipitación. Las características de estos mecanismos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Características de los mecanismos de biosorción

Mecanismo	Características
Complejación	- El metal forma complejos químicos al unirse a la pared celular, ya que se une a ella mediante enlaces químicos.
Adsorción física (Fisisorción)	- Proceso exotérmico (Tiene lugar las fuerzas de Van der Waals) - Se caracteriza por no alterar la naturaleza química de la especie adsorbida. - Es un fenómeno general y no específico (no existe una selectividad marcada entre el adsorbato y adsorbente) - Es una interacción débil (El adsorbato no se adhiere fuertemente al adsorbente).
Adsorción química (Quimiosorción)	- Tiene especialidad (determinados sitios de la superficie adsorben determinadas moléculas). - Se forma un verdadero enlace químico (hay interacción entre el adsorbato y el adsorbente). - Hay reacción química superficial (se rompen y forman enlaces) - Requiere de energía para iniciar el proceso (El proceso requiere de activación no es espontáneo).
Intercambio iónico	- Es un proceso que tiene una fase sólida y una acuosa, donde se permutan iones con la misma carga. - Cuando las resinas con iones de sodio se agotan, se pueden regenerar a través de una solución de cloruro sódico.

Mecanismo	Características
Precipitación	- Proceso por el cual se precipitan los metales pesados a través del uso de agentes químicos como los hidroxilos.

Nota. Adaptado de Tejada et al. (2012); OMS (2006).

2.1.4.4. Factores que influyen en el proceso de biosorción

- Tipo de material biosorbente

La elección del biosorbente depende del contaminante que se desea remover. La biomasa contiene diversos grupos funcionales como carboxilo, hidroxilo, amina, fosfato y tiol (Broche et al., 2018). Los contaminantes presentan afinidad con estos grupos funcionales de acuerdo con sus características. Al respecto Tejada et al. (2014) indican que los grupos funcionales que contienen oxígeno remueven mayor cantidad de metales pesados.

La Tabla 9 presenta los resultados de la eficiencia en la adsorción de contaminantes según el tipo de biomasa utilizada.

Tabla 9

Comparación de porcentaje de remoción de distintos biorresiduos

Adsorbente	Contaminante	% Remoción	Capacidad de adsorción	Referencia
Hueso de Nanche	Cd(II) y Pb(II)	84 % y 82 %	9,73 mg/g y 7,15 mg/g.	Espinosa et al., 2020
Cacao	Pb y Cd	91,32 y 87,80%	--	Lara et al., 2016
Marlo de maíz (<i>Zea mays</i>)	Pb(II)	97 %	7,9 mg/g	Oré et al., 2015

Adsorbente	Contaminante	% Remoción	Capacidad de adsorción	Referencia
Yuca	Pb(II)	--	52,34 mg/g	Tejada et al., 2016
Ñame	Pb(II)	--	98,36 mg/g	Tejada et al., 2016
Cabuya	Cr ⁺⁶	67 %	--	Santillán et al., 2019
Cáscara de huevo	S	--	0,0629 mg L-1	Revelo et al., 2019
Cáscara de naranja	Pb (II) y Zn (II)	99.5 % - 99.5 %	9,39 mg - 9,94 mg	Cardona et al., 2013

Nota. “--” Indica ausencia de valor.

- Efecto de la granulometría

Tejada et al. (2016) indican que el tamaño óptimo de las partículas para la adsorción debe estar entre 0,5 y 1 mm. Por su parte, Revelo et al. (2019) mencionan que la cáscara de huevo de gallina alcanza su máxima eficacia a 200 µm y advierten que una mayor porosidad disminuye la eficiencia de adsorción. De igual modo, Tejada et al. (2014) explican que las partículas menores a 0,3 mm presentan una mayor superficie de adsorción debido a una mayor cantidad de poros.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS (2005) indica que, para un filtro lento, el diámetro efectivo de la partícula debe estar entre 0,15 y 0,35 mm.

- Efecto del pH

El pH de la disolución influye en la capacidad de adsorción, ya que afecta a los grupos funcionales que pueden volverse positivos o negativos (Tejada et al., 2014). Además, modifica las propiedades de los iones metálicos en solución; debido a la competencia entre los iones H^+ de la biomasa y los del sorbato (Ruiz, 2012).

Un pH bajo favorece una carga positiva del biosorbente, lo que dificulta su interacción con una disolución también cargada positivamente. En contraste, un pH alto en la disolución influye en la carga negativa del biosorbente, incrementando la biosorción de las especies catiónicas (Izquierdo, 2010). Por tanto, a valores bajos de pH la eficiencia de la biomasa disminuye mientras que a valores elevados puede ocurrir precipitación.

Payán (2016) indica que el efecto del pH en la adsorción varía de acuerdo con el tipo de metal que se desee remover, y establece un rango ideal entre 5 y 7. Asimismo, Espinosa et al. (2020) encontraron que el porcentaje de remoción de metales pesados aumenta en un rango de pH de 5 a 8. Esto debido a que a pH bajo puede haber competencia de los iones H^+ y a pH alto los iones metálicos pueden precipitar por la formación de hidróxidos metálicos, lo que puede generar una sobreestimación de la capacidad de adsorción de la biomasa (Lara et al., 2016; Izquierdo, 2010).

Por lo tanto, según Izquierdo (2010) no existe un pH óptimo general, esto depende de la naturaleza química del biosorbente y de las características del contaminante.

- Efecto del caudal

Rincones et al. (2015) indican que un caudal menor aumenta la adsorción del biofiltro y reduce el riesgo de taponamientos. Por tanto, el caudal está en función de la cantidad de biomasa, granulometría y tamaño del biofiltro.

- Efecto de la temperatura

Un incremento de la temperatura por encima de condiciones normales produce cambios en el material sorbente, comprometiendo la capacidad de sorción (Tejada et al., 2014). No obstante, si la temperatura se mantiene constante el proceso no se ve afectado (Tejada et al., 2015).

- Efecto de la concentración inicial del contaminante

La concentración inicial del contaminante es uno de los factores que intervienen en la remoción. A mayor concentración de contaminante en la solución, la eficiencia de la remoción suele ser menor, mientras que a menor concentración la eficiencia tiende a incrementarse (Asma et al., 2022).

- Efecto de la altura del biofiltro

La altura del biofiltro influye en el tiempo de retención hidráulica, en el riesgo de taponamientos y en la retención de contaminantes. En general, a mayor altura, mayor retención de contaminante y un mayor tiempo de servicio (Ruiz, 2012).

- Efecto de la cantidad del biosorbente

Una mayor cantidad de biosorbente mejora la retención de contaminantes presentes en la disolución (Ruiz, 2012 y Vera et al., 2022).

2.1.4.5. Parámetros para el funcionamiento del biofiltro

- Volumen del efluente

Determina el volumen del efluente en función del caudal y el tiempo (Vera et al., 2018).

$$V_{ef} = Q * t_{total} \quad (1)$$

Donde:

V_{ef} : Volumen del efluente.

Q : Caudal (mL/min).

t_{total} : Tiempo total (min).

- Eficiencia de remoción en función a los parámetros

Determina la eficiencia de remoción de cada parámetro medido (Marín et al., 2019):

$$\%Ef = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

%Ef: Eficiencia porcentual del filtro.

P_i: Representa la propiedad inicial medida.

P_f: Representa la propiedad medida después del filtrado.

- Capacidad de adsorción

Se calcula utilizando la concentración inicial y final del soluto, el volumen de la solución, y la masa del adsorbente (Ramón et al., 2019)

$$Q_e = \frac{V \cdot (C_i - C_f)}{m} \quad (3)$$

Donde:

Q_e: Capacidad de adsorción (mg/g) (Masa de metal absorbido por unidad de biomasa)

C_i: Concentración inicial de soluto (adsorbato) en la solución (mg/L)

C_f: Concentración final de soluto (mg/L)

V: Volumen de solución (L)

m: Masa del Adsorbente (g)

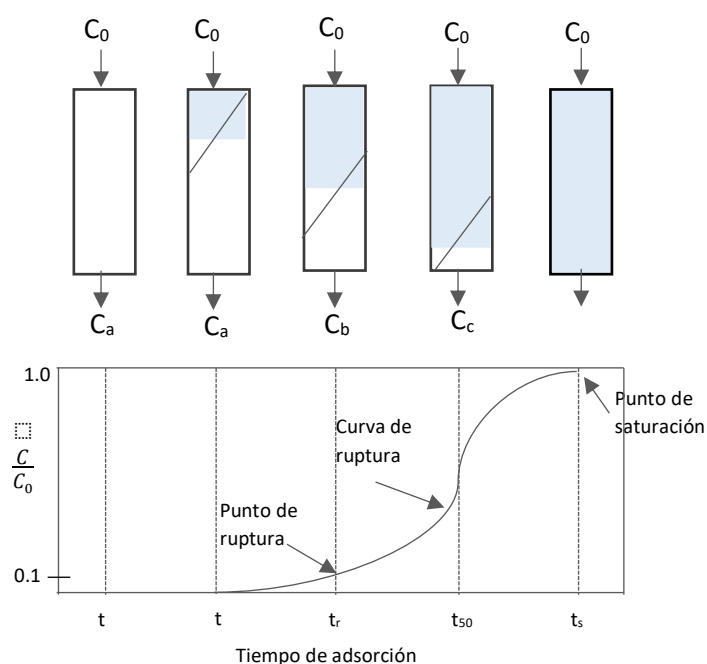
2.1.4.6. Ensayos de biosorción en columna

Vizcaíno y Fuentes (2015) indican que el método de lecho fijo es más efectivo cuando se utiliza biomasa para remover metales. La metodología consiste en usar una columna que contiene biomasa, la cual actúa como adsorbente, a través de la cual circula el flujo con el adsorbato.

Para determinar el tiempo de servicio del biofiltro, se calcula el punto de ruptura que suele estar relacionado con los límites máximos permisibles (LMP). Este cálculo permite estimar el volumen de efluente a tratar por un determinado biosorbente, bajo ciertas condiciones establecidas. Algunos autores establecen como el punto ruptura cuando la concentración del adsorbato llega al 10% con respecto a la concentración inicial en función del tiempo ($C/C_0 = 0,1$), así como se muestra en la figura 3 (Ríos y Castellar, 2013).

Figura 3

Curva de ruptura y saturación de la columna



Nota. Adaptado de Ríos y Castellar (2013).

A partir de este punto de ruptura, también denominado tiempo de servicio, se modela la curva de ruptura, la cual representa la evolución de la concentración de metales pesados en el tiempo, desde la concentración inicial (C_0) cuando el adsorbente aún no ha retenido soluto, hasta la concentración final (C) que indica la saturación total de la columna (Vera et al., 2022).

Para determinar la saturación del lecho fijo, se toman muestras del volumen de agua que pasa por la columna en diferentes intervalos de tiempo, hasta que el biofiltro pierde su eficiencia y la concentración del efluente a la salida se iguala a la del influente (Higuera et al, 2008). En la práctica, se considera que el tiempo de saturación ocurre cuando la concentración alcanza un valor entre 90% y 95% (Ruiz, 2012).

2.1.4.7. Modelos matemáticos de adsorción en columna

La cinética del proceso de biosorción en columna se calcula empleando los modelos matemáticos, como el de Thomas y el de dosis respuesta modificado, los cuales describen el comportamiento dinámico del sistema en función del volumen del efluente tratado.

- Modelo de Thomas

Este modelo permite estimar la capacidad máxima de adsorción en función del tipo de biomasa, del volumen del efluente, del caudal de alimentación, de la capacidad de sorción y de la constante de velocidad (Lara et al., 2016; Vera et al., 2018).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{1 + e^{\left[\frac{K_{th}}{Q} (q_0 * m_B - c_0 * V_{ef}) \right]}} \quad (5)$$

Donde:

K_{th} : Constante de velocidad (mL/min mg).

q_0 : Capacidad de adsorción del modelo de Thomas (mg/g)

m_B : masa del biosorbente (g).

V_{ef} : Volumen del efluente (mL)

Q: Caudal de alimentación (mL/min)

- Modelo dosis respuesta modificado

Este modelo describe la curva de ruptura en sistemas de columna o de lecho fijo, mostrando el comportamiento de la remoción en tiempos cortos como en largos. Para realizar los cálculos se utiliza la siguiente ecuación (Vera et al., 2018).

$$\ln\left(\frac{c}{c_0-c}\right) = a * \ln V_{ef} - a * \ln\left(\frac{q_0 * m_b}{c_0}\right) \quad (6)$$

Donde:

$\ln\left(\frac{c}{c_0-c}\right)$: Esta en función del volumen.

a : Constante del modelo

q_0 : Máxima concentración del soluto en la fase sólida (mg/g).

2.1.5. Tratamiento de los residuos de biofiltro

Las técnicas más usadas para tratar los biorresiduos son calcinación y desorción; a continuación, describimos cada una de estas técnicas.

Calcinación de la biomasa residual

Vizcaíno y Fuentes (2015) indican que la calcinación del material filtrante se lleva a cabo a una temperatura de 700 °C y constituye una de las mejores opciones para estabilizar iones metálicos porque permite encapsular los metales y reducir el volumen del material tratado.

Por su parte, Liu et al. (2020) proponen el uso de la pirólisis como una técnica efectiva para estabilizar los metales pesados presentes en la biomasa, generando biocarbón el cual puede disponerse en un relleno sanitario.

2.1.5.1. Desorción y regeneración de la biomasa

La desorción emplea soluciones ácidas y básicas para tratar el material filtrante utilizado como biosorbente, permitiendo la recuperación de metales pesados (Cañizares, 2000).

Hernández et al. (2017) lograron una desorción de 69,6 % de plomo, empleando 825 ml de ácido clorhídrico (HCl) con una concentración de 0,1 M de la biomasa residual de un biofiltro a base de Elodea. Los resultados indican que se podría obtener un mejor rendimiento de la desorción si se aumenta el volumen del desorbente.

2.2. Definición de términos básicos

- **Tratamiento de agua**

Es un proceso físico, químico o biológico que permite remover los contaminantes del agua hasta alcanzar los límites máximos permisibles establecidos en la normativa (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [MVCS], 2006).

- **Estándar de Calidad Ambiental (ECA)**

Establece el nivel de concentración de parámetros físicos, químicos o biológicos, presentes en el agua, aire o suelo, que actúan como cuerpos receptores, de manera que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente (MINAM, 2005).

- **Límite Máximo Permisible (LMP)**

Son medidas establecidas en la normativa con respecto a la concentración de los parámetros físicos, químicos o biológicos en efluentes o emisiones, con potencial para afectar a la salud de humana y al ambiente, si se sobrepasan las medidas establecidas en la normativa (MINAM, 2005).

- **Adsorción**

Es un fenómeno superficial mediante el cual los adsorbatos son transferidos desde la fase líquida hacia la superficie del adsorbente (Vizcaíno et al., 2017). La adsorción puede ser física (fisisorción, denominada por fuerzas de Van der Waals) o química (quimisorción). La adsorción física se caracteriza porque el elemento adsorbido conserva sus compuestos químicos; a diferencia de la adsorción química que cambia su composición (Quiñones et al., 2014).

Un buen adsorbente presenta sitios específicos de adsorción, amplia superficie de contacto y porosidad (Valladares et al., 2016).

- **Absorción**

Proceso endotérmico, en el cual una sustancia es incorporada al volumen de la otra, pudiendo ocurrir de manera simultánea con la adsorción (Viades, 2013).

- **Sorción**

Proceso en el que la adsorción y absorción ocurre simultáneamente (Quiñones et al., 2014).

- **Metales pesados**

Son elementos químicos con alta densidad (mayor a 4 g/cm³), masa y peso atómico superior a 20 (Pabón et al., 2020). Los metales pesados más tóxicos, incluso a bajas concentraciones son el mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd) (Mamani et al., 2019; MVCS, 2006).

- **Eficiencia**

Capacidad de conseguir un fin determinado, considerando la cantidad de recursos empleados y el tiempo (Real Academia Española [RAE], 2018; Calvo et al., 2018).

- **Eficacia**

Es la capacidad de lograr el objetivo planteado, independientemente de los recursos empleados (RAE, 2018; Calvo et al., 2018).

CAPÍTULO III

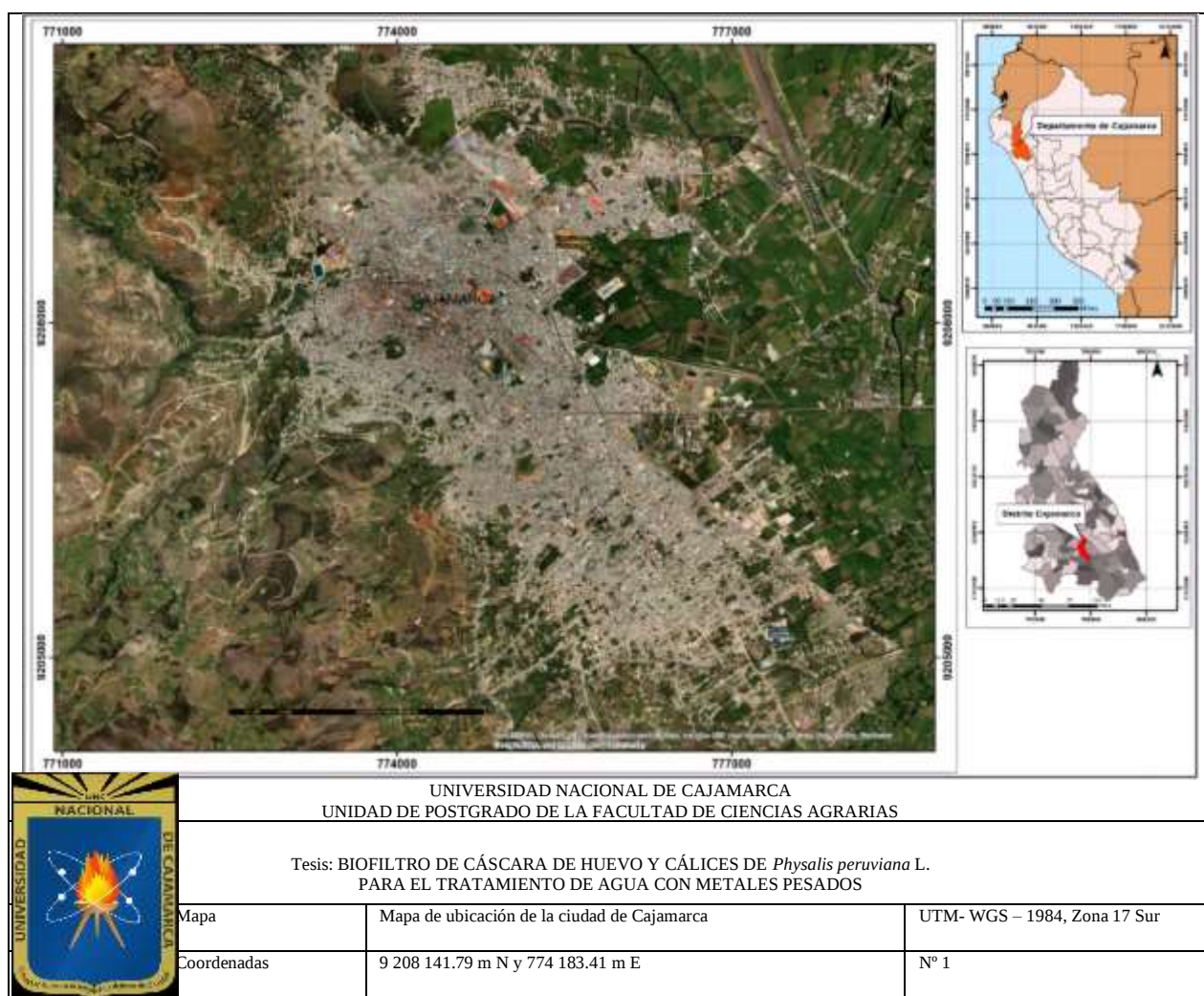
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la zona de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cajamarca, capital de la provincia y del departamento del mismo nombre, ubicada en la Sierra Norte del Perú, a una altitud de 2 720 m s. n. m., en las coordenadas UTM (WGS 84): 9 208 141,79 m N y 774 183,41 m E (Boucher y Requier, 2005; INEI, 2017). La Figura 4 muestra el mapa de ubicación de la ciudad de Cajamarca.

Figura 4

Mapa de ubicación de la ciudad de Cajamarca



3.2. Características climáticas

Según la clasificación climática de Köppen, el distrito de Cajamarca presenta un clima templado, con una temperatura media anual de 15,6 °C, caracterizado por noches frías y días cálidos. Las precipitaciones ocurren de octubre a marzo, mientras que el resto del año corresponde a la época seca (Municipalidad Provincial de Cajamarca, 2022).

3.3. Características geomorfológicas y geológicas

El distrito de Cajamarca presenta diversos procesos geomorfológicos, entre ellos, destaca: la erosión en cárcavas, movimientos complejos, caídas de rocas y derrumbes, que afectan aproximadamente al 24,5 % del territorio. Sus unidades geológicas corresponden al 31 % a formaciones sedimentarias, el 31 % a formaciones volcánicas y el 23 % a formaciones no consolidadas del cuaternario, mientras que el casco urbano representa el 3,5 % del territorio. (Municipalidad Provincial de Cajamarca, 2022).

3.4. Características hidrológicas

El distrito de Cajamarca cuenta con el 0,2 % de cuerpos de agua en su territorio. Su principal río es el Mashcón, que al confluir con el río Chonta dan origen al río Cajamarquino (Municipalidad Provincial de Cajamarca, 2022).

3.5. Equipos y Materiales

- **Biomasa**
 - Cáscaras de huevo de gallina.
 - Cálices de *Physalis peruviana* L.

- **Equipos**

- Balanza digital marca SF 400.
- Tamices estándar N° 4, 40 y 60 (marca Forney)
- Molino manual marca Corona L12107.
- Sistema de goteo.
- Termómetro marca Hanna, modelo HI1610D.
- Mufla marca Labtron, serie LMF-B.

- **Material de laboratorio**

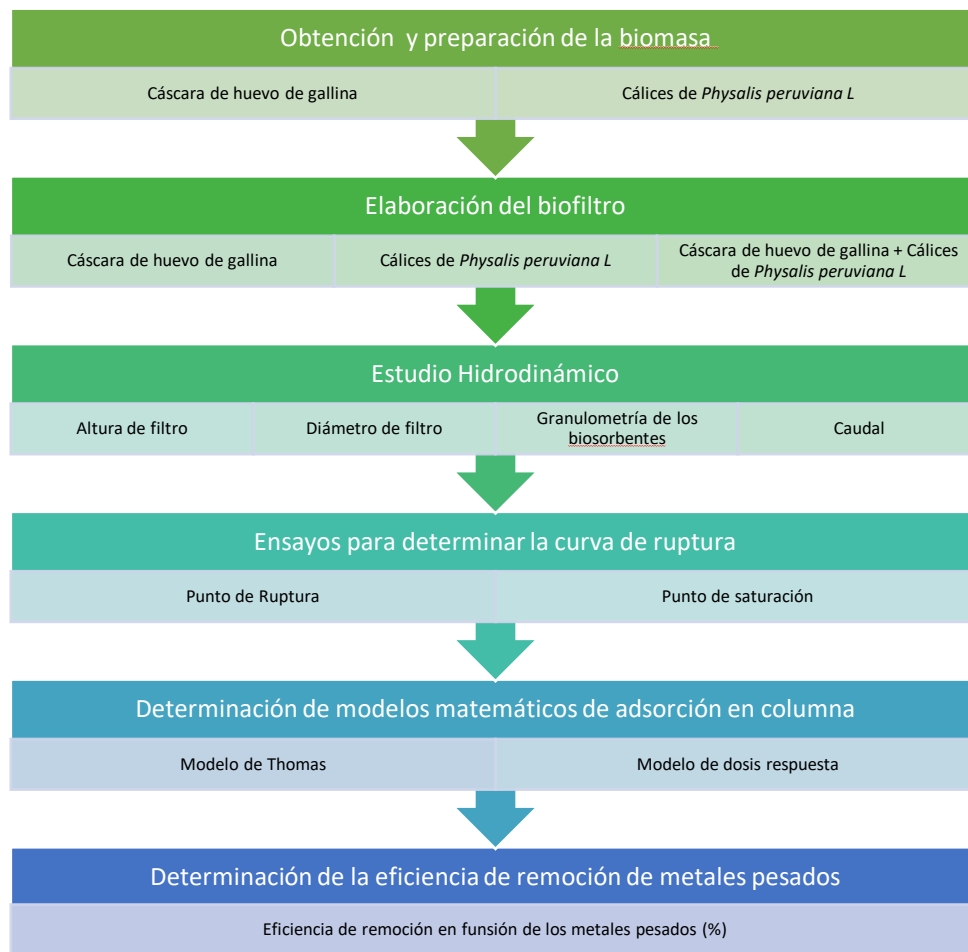
- Probeta de 500 ml.
- Gravilla.
- Vasos de precipitación de 150 ml.
- Porta filtro de madera.
- Tanque de agua de 70 l de capacidad.
- Tubos de centrifuga de 50 ml.
- Recipientes para muestras.
- Cintas de pH.
- Cronómetro del celular Samsung A54.
- Marcador permanente para el etiquetado de recipientes.
- Agua destilada.

3.6. Metodología

Para realizar el presente estudio se siguieron los pasos mencionados en la Figura 5 desde la obtención de los materiales filtrantes hasta la determinación de su eficiencia.

Figura 5

Procedimiento de la Investigación



3.6.1. Obtención y preparación de la biomasa

La Tabla 10 detalla los pasos para la obtención y preparación de la biomasa filtrante.

Tabla 10*Obtención y preparación de los biofiltros*

Proceso	Cáscara de huevo de gallina	Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L.
Obtención de la biomasa	Las cáscaras de huevo de gallina fueron obtenidas de la panadería Jireh, ubicada en la cuadra siete del Barrio San Martín de Porres de la ciudad de Cajamarca.	Los cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. fueron obtenidos de una empresa cajamarquina especializada en la elaboración de pasas y mermelada.
Selección	Se seleccionaron únicamente las cáscaras libres de residuos.	Se seleccionaron los cálices en buen estado y libres de residuos.
Limpieza	Las cáscaras de huevo se lavaron con agua potable, se les retiraron las membranas internas y se las enjuagó con agua destilada.	Los cálices fueron lavados con agua potable y se enjuagaron con agua destilada.
Secado	Se secaron en una mufla.	Se secaron en una mufla.
Reducción de tamaño	Se trituraron en un molino manual.	Se trituraron en un molino manual.
Tamizado	Se tamizaron obteniendo granulometrías de 250 μm y 425 μm .	Se tamizaron obteniendo granulometrías de 250 μm y 425 μm .
Almacenamiento	Se almacenaron en sobres de papel.	Se almacenaron en sobres de papel.

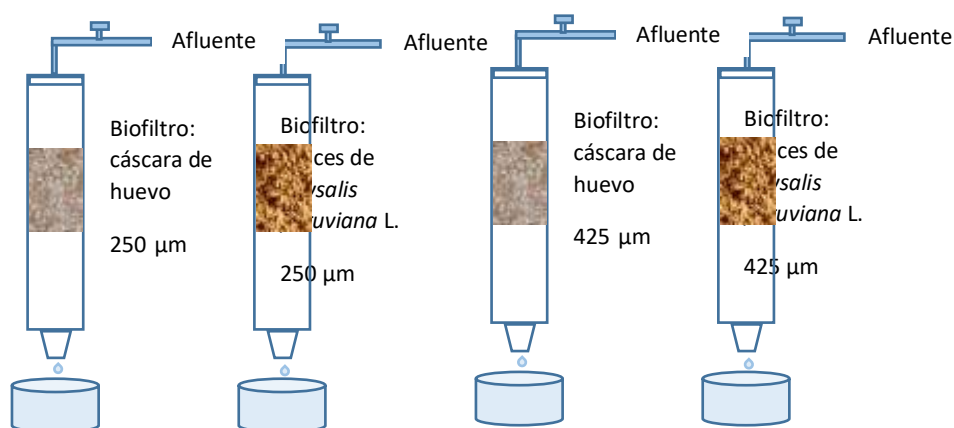
Nota. Las fotografías del proceso se presentan en el anexo 1.

3.1.1. Elaboración del biofiltro

Los biofiltros fueron elaborados en tubos cónicos de centrífuga de 50 ml, en los cuales se depositó el material filtrante hasta alcanzar una altura de 6 cm. Para evitar el arrastre y/o flotación de las partículas de la biomasa, se colocaron 2 cm de gravilla en la base del biofiltro y 1 cm en su parte superior. El flujo del efluente se condujo por gravedad desde un tanque de 70 litros hasta el lecho filtrante, lo que permitió mantener un flujo constante y controlado. La Figura 6 muestra el esquema de los biofiltros.

Figura 6

Esquema de los biofiltros



Nota. Adaptado de Marín y Arriojas (2020).

El caudal ideal para el experimento se determinó mediante pruebas hidrodinámicas, seleccionando un valor adecuado de acuerdo con las características de las cuatro muestras de biomasa. En la Tabla 11 se describen las características de los filtros.

Tabla 11

Descripción del biofiltro elaborado con cáscara de huevo y Physalis peruviana L.

Parámetros	Cáscaras de huevo de gallina 425 µm	Cáscaras de huevo de gallina 250 µm	Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 µm	Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 µm
Altura del biofiltro (cm)	6	6	6	6
Diámetro (cm)	2,8	2,8	2,8	2,8
Biomasa (g)	46	42	9	7
Granulometría (µm)	250	425	250	425
Caudal (ml/min)	4,53	4,53	4,53	4,53
pH (Unidades de pH)	6,31	6,31	6,31	6,31
Temperatura (C°)	18,1	18,1	18,1	18,1

Nota. Modificado de Olubunmi et al. (2020); Asma et al. (2022); Mashangwa et al. (2017).

3.1.2. Proceso del experimento

Cada ensayo se replicó tres veces para cada uno de los biofiltros, obteniéndose un total de 60 muestras, además de la correspondiente a la concentración inicial. El agua potable fue recolectada en un tanque de 70 l y contaminada deliberadamente con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As) hasta alcanzar una concentración de 8,5 mg/L. Posteriormente, esta agua fue conducida por acción de la gravedad a través de los biofiltros, manteniéndose constante el pH y la temperatura durante todo el proceso.

El agua tratada fue recolectada en intervalos de 30, 130, 230, 330 y 430 min y posteriormente las muestras fueron analizadas por el Laboratorio Regional del Agua, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). Con los resultados se elaboró la curva de ruptura, se calculó la capacidad de biosorción utilizando los modelos matemáticos de Thomas y de dosis respuesta modificada, y finalmente se determinó la eficiencia de remoción de los metales pesados en porcentaje.

3.1.3. Análisis de datos

Para el análisis de los datos, se empleó la estadística inferencial. Para determinar los efectos entre los biofiltros y los metales, se realizó el análisis de varianza de dos vías (ANOVA de dos vías), y para comparar la eficiencia entre los biofiltros se utilizó la prueba de post-hoc de Tukey. El análisis estadístico se llevó a cabo con el programa Python, versión 3.x (Python Software Foundation, 2024) en el entorno de ejecución en la nube Google.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de la eficiencia de los Biofiltros del biofiltro elaborado con cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As).

La eficiencia de remoción de metales pesados en función del tipo de biofiltro, tamaño de partícula y tiempo de contacto se presenta en la Tabla 12. La biomasa de cáscara de huevo en ambas granulometrías (250 y 425 μm) mostraron un desempeño superior, especialmente para el plomo (Pb), con eficiencias que superaron el 97 % a lo largo de 430 min de operación. Este rendimiento sostenido se atribuye a las propiedades fisicoquímicas del material, como los nanoporos amorfos, que incrementan su área superficial y los puntos de contacto, lo que favorece la capacidad de adsorción frente a las estructuras cristalinas (Revelo et al., 2019; Annane et al., 2021). Además, la superficie porosa y fibrilar de la cáscara de huevo permite la unión con cationes metálicos, facilitando la retención de metales de carga positiva (Duany et al., 2022).

Para el cadmio (Cd) y el cromo (Cr), la cáscara de huevo alcanzó sus máximas eficiencias durante los primeros 130 min con valores superiores al 71 %, observándose una disminución gradual en tiempos posteriores. Este comportamiento coincide con lo reportado por Torres et al. (2018), quienes indican que la saturación de los sitios activos y la competencia entre los protones (H^+) e iones metálicos reducen la capacidad de adsorción en tiempos prolongados. Por el contrario, la remoción de arsénico (As) estuvo por debajo del 50% en todos los tiempos evaluados, resultado coherente con la naturaleza química del As (III) a pH (6,31), donde su forma neutra limita los mecanismos de intercambio iónico (Asma et al., 2022; Rangel et al., 2015).

Tabla 12

Eficiencia de remoción (%R) de los metales pesados en los biofiltros en función del tiempo

Metal pesado	Tiempo (min)	Eficiencia de Remoción (%R) de Cadmio (Cd)	Eficiencia de Remoción (%R) de Cromo (Cr)	Eficiencia de Remoción (%R) de Plomo (Pb)	Eficiencia de Remoción (%R) de Arsénico (As)
Cáscara de huevo de gallina 250 µm	30	99,90	98,90	99,90	48,60
	130	99,40	98,50	99,90	47,50
	230	94,80	95,30	99,90	45,40
	330	75,50	89,70	99,90	44,50
	430	64,90	87,10	99,80	43,80
Cáscara de huevo de gallina 425 µm	30	88,00	86,20	99,90	48,30
	130	71,00	84,40	99,90	40,50
	230	64,40	56,80	99,50	36,90
	330	29,80	54,70	98,70	32,30
	430	33,80	52,10	97,60	30,20
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 µm	30	58,70	78,20	99,80	10,20
	130	5,50	8,30	99,60	5,70
	230	3,90	4,20	92,10	3,80
	330	2,60	3,30	66,50	1,20
	430	1,20	2,10	45,70	0,90
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 µm	30	6,70	14,60	92,90	4,10
	130	4,70	7,50	85,50	2,90
	230	3,90	4,90	47,40	2,10
	330	3,20	4,20	25,50	1,60
	430	1,80	3,40	17,70	1,30

Nota. La eficiencia de remoción muestra los datos promedios de las repeticiones experimentales. Se calculó con base en la concentración del efluente en tiempos de 30, 130, 230, 330 y 430 min.

Los biofiltros elaborados con cálices de *Physalis peruviana* L. presentan una alta eficiencia para el Pb en los primeros 30 min (> 85 %), pero con un rendimiento significativamente inferior para el Cd, Cr y As. Los cálices con granulometría de 250 µm alcanzaron valores de remoción del 78 % para el Cr hasta los 30 min, mientras que para el Cd y As la eficiencia no supera el 59 % y el 10 % respectivamente. Esto sugiere que, aunque los cálices contienen grupos funcionales O–H, C=O y C–O con capacidad adsorbente (Vera

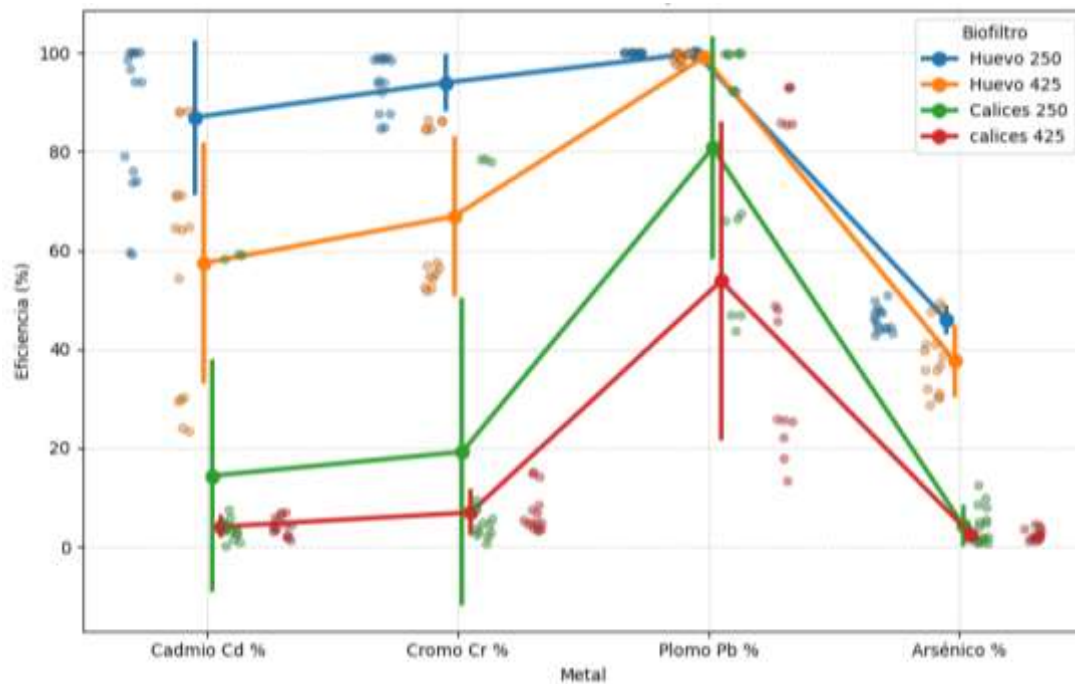
et al., 2018; Lara et al., 2016), su estructura porosa y superficie específica son menos favorables que las cáscaras de huevo de gallina.

El efecto del tamaño de la partícula fue particularmente evidente en la cáscara de huevo de granulometría de 250 μm , la cual mostró un mayor rendimiento en la remoción, especialmente para Pb y Cr, debido a su superficie porosa y fibrilar que permite la unión con cationes metálicos, facilitando la retención de metales de carga positiva (Duany et al., 2022). En el caso de los cálices de *Physalis peruviana* L. el tamaño de partícula de 250 μm fue más eficiente en la remoción de plomo (Pb), y la de granulometría de 425 μm fue más eficiente para remover cadmio (Cd), cromo (Cr) y arsénico (As), posiblemente por diferencias en la difusión intrapartícula y la accesibilidad a sitios activos. La Figura 7 presenta la eficiencia de remoción promedio de los metales pesados por biofiltro.

Comparando los resultados con estudios previos, la eficiencia de Pb (> 97%) y Cr (> 93%) en promedio para la cáscara de huevo, supera ampliamente los valores reportados por Escobar et al. (2012) y Torres et al. (2018), lo que podría atribuirse a las condiciones de operación en flujo continuo por gravedad y al pH cercano a la neutralidad (6,31), valor óptimo para la adsorción de cationes metálicos y la cantidad de sustrato empleada (Acosta et al., 2007; Lavado y Ore, 2016). La baja remoción de As concuerda con lo reportado por Asma et al. (2022), quienes indican que su adsorción máxima ocurre a pH 4,5. Este comportamiento puede explicarse porque a pH ácido, la elevada concentración de protones (H^+) compite con los iones metálicos por los sitios activos de adsorción, mientras que, a pH alcalinos, la precipitación de los metales interfiere en la determinación de la verdadera eficiencia del biofiltro (Espinosa et al., 2020; Lara et al., 2016; Bedoya et al., 2023).

Figura 7

Interacción de los biofiltros con los metales pesados con puntos individuales



Nota. Figura 7 fue elaborada a partir de los datos del experimento, muestra la eficiencia de remoción promedio de los biofiltros para cada metal.

En síntesis, la Figura 7 muestra la versatilidad y eficiencia de la cáscara de huevo de 250 μm en la remoción de Pb, Cr y Cd, mientras que el tratamiento de As requeriría ajustes de pH o la combinación con otros adsorbentes. Estos resultados evidencian el potencial de la cáscara de huevo en sistemas de tratamiento de agua, combinando su eficiencia, fácil operación y disponibilidad.

Análisis estadístico:

El análisis de varianza (ANOVA) de dos vías (Tabla 13) determinó que el tipo de biofiltro y el tipo de metal influyen de manera significativa en la eficiencia de remoción ($p < 0,001$ en ambos casos). Asimismo, la interacción entre ambos factores fue significativa ($p < 0,001$), lo que indica que el rendimiento del biofiltro no es constante para todos los metales,

sino que depende de la combinación específica biofiltro metal. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alterna (H_1), confirmando que los biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y los cálices de *Physalis peruviana* L. son eficientes en la remoción de Cd, Cr, Pb y As.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) de dos vías de la eficiencia de los biofiltros en la remoción de metales pesados

	Suma de Cuadrados	gl	F	Valor p
C(biofiltro)	164373,264	3,0	212,009	< 0,001
C(metal)	117142,461	3,0	151,090	< 0,001
C(biofiltro):C(metal)	20641,832	9,0	8,874	< 0,001
Residual	57889,948	224,0		

Nota. Los datos se analizaron mediante ANOVA de dos vías usando el paquete *statsmodels* en Python.

La prueba post-hoc de Tukey (Tabla 14) mostró que existen diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia de remoción entre la mayoría de los filtros evaluados. Los biofiltros de cáscara de huevo de gallina son significativamente más eficientes que los biofiltros de cálices. La diferencia es notable, con una media de eficiencia de 51,99 % mayor para la cáscara de huevo de 250 μm frente a los cálices de 250 μm (valor $p < 0,001$) y 35,57 % mayor para la de granulometría de 425 μm (valor $p < 0,001$). No se observa diferencia estadísticamente significativa en la eficiencia de remoción entre los biofiltros de cálices con granulometría de 250 y 425 μm (valor $p = 0,0708$).

El tamaño de partícula influye en la eficiencia de la cáscara de huevo con granulometría de 250 μm , demostrando ser significativamente más eficiente que la granulometría de 425 μm (valor $p = 0,0108$), con una diferencia media de 16,42 %.

Tabla 14

Resultado de la prueba post-hoc de Tukey HSD para la diferencia de eficiencia entre los biofiltros

Comparación de grupos	Diferencia de medias	Valor p (ajustado)	Diferencias significativas
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 μm vs cáscara de huevo 250 μm	51,99	< 0,001	Significativo
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 μm vs cáscara de huevo 425 μm	35,57	< 0,001	Significativo
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 μm cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 μm	-12,88	0,0708	No significativo
Cáscara de huevo 250 μm vs cáscara de huevo 425 μm	-16,42	0,0108	Significativo
Cáscara de huevo 250 μm vs cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 μm	-64,87	< 0,001	Significativo
Cáscara de huevo 425 μm vs cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 μm	-48,45	< 0,001	Significativo

Nota. Los resultados de la prueba de post-hoc de Tukey se presentan para las comparaciones por pares entre los biofiltros. Los valores negativos indican que el primer biofiltro tuvo menor eficiencia que el segundo. El análisis se realizó usando el paquete *statsmodels* en Python.

Desde una perspectiva teórica, la presente investigación contribuye al conocimiento de la eficiencia de la biosorción utilizando biomasa de cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. con granulometrías de 250 μm y 425 μm en la remoción de plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y arsénico (As). Los resultados respaldan la teoría de que la cáscara de huevo de gallina tiene un alto potencial para su uso como biofiltro de iones metálicos gracias a los grupos funcionales derivados del óxido de calcio (CaO) y del carbonato (CO_3^{2-}). El CaO posee una carga superficial negativa que ejerce atracción sobre los cationes de los metales pesados, proceso electrostático que facilita su adsorción.

En términos prácticos, los resultados muestran que los biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. operados en un sistema de flujo continuo por gravedad, son eficientes para remover plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y arsénico (As). En consecuencia, estos biofiltros podrían aplicarse en el tratamiento de aguas contaminadas o efluentes industriales.

Metodológicamente, el uso de biorresiduos en sistemas de flujo continuo por gravedad demostró ser una estrategia eficiente para la reducción de metales pesados en medios acuosos, lo que respalda su aplicabilidad en contextos similares.

4.2. Modelamiento del rendimiento cinético y la durabilidad de los biofiltros de lecho fijo elaborado con cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As).

En las Figuras 8 a 11 se muestran las curvas de ruptura (C/C_0) de cada biofiltro en función del tiempo. El punto de ruptura se estableció al 10 % y como punto de saturación el 90 % de la concentración inicial. Estos resultados, complementados con la vida útil del lecho (t_R) de la Tabla 15, ofrecen una visión completa del desempeño de cada material.

Los biofiltros de cálices de *Physalis peruviana* L. (250 μm y 425 μm) y el de cáscara de huevo de 425 μm alcanzaron el punto de ruptura durante los primeros 30 min de operación. En cambio, el biofiltro de cáscara de huevo de 250 μm lo alcanzó a los 260 min para el Cd y 330 min para el Cr.

El Pb registró su punto de ruptura a los 100 min en el material de cálices de *Physalis peruviana* L. 425 μm , y a los 240 min en la granulometría de 250 μm . En cambio, los biofiltros de cáscara de huevo para ambas granulometrías no llegaron al punto de ruptura durante los 430 min de operación, lo que respalda su capacidad superior para remover Pb. La

vida útil del lecho (t_R) en estos biofiltros alcanzó 99,80 % y 97,60 %, lo que confirma una adsorción alta y sostenida en el tiempo.

Figura 8
Curva de ruptura para el biofiltro de cáscara de huevo 250 μm

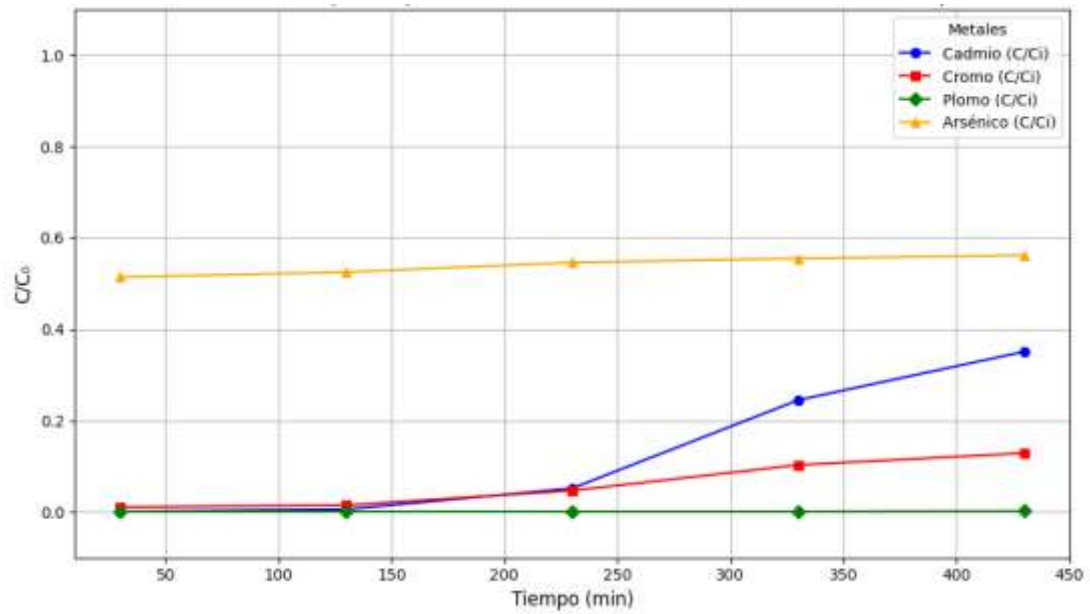


Figura 9
Curva de ruptura para el biofiltro de cáscara de huevo 425 μm

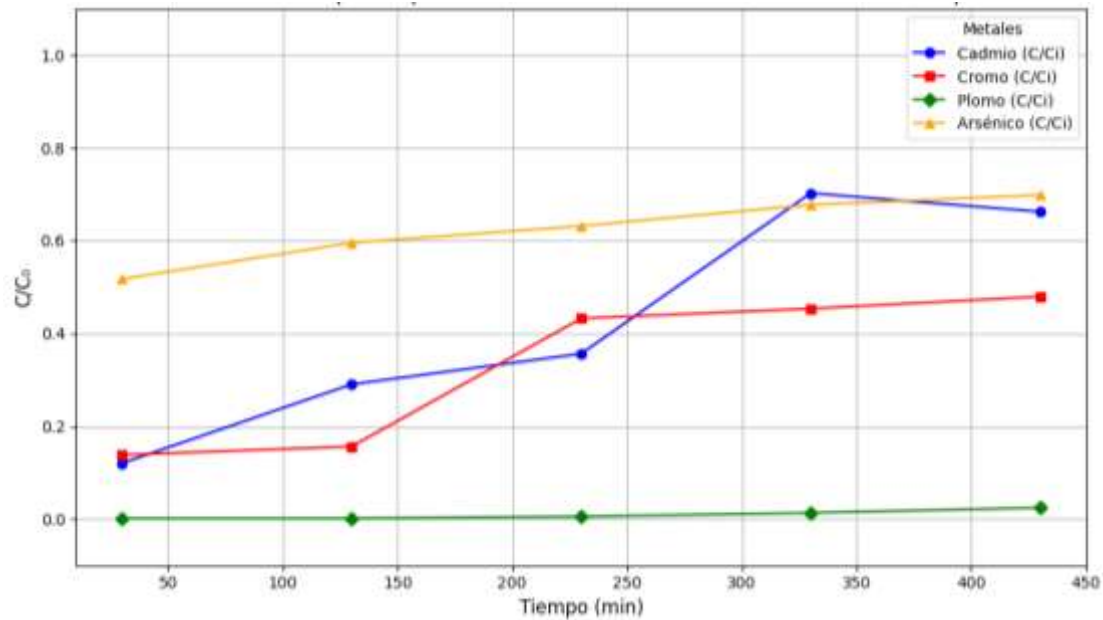


Figura 10

Curva de ruptura para el biofiltro de cálices de *Physalis peruviana* L. 250 μm

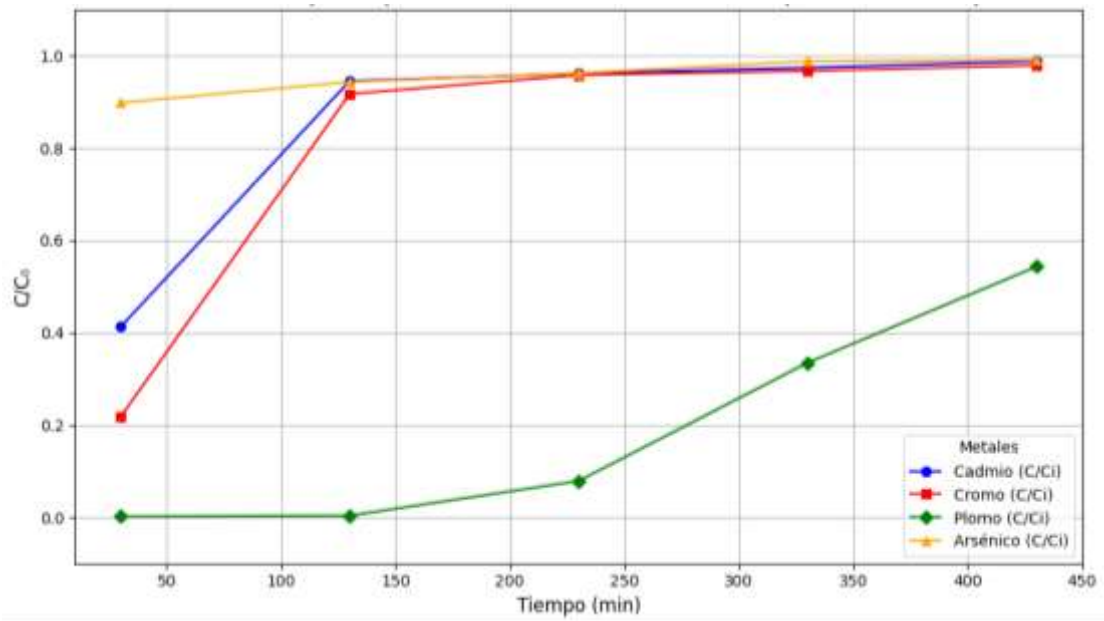
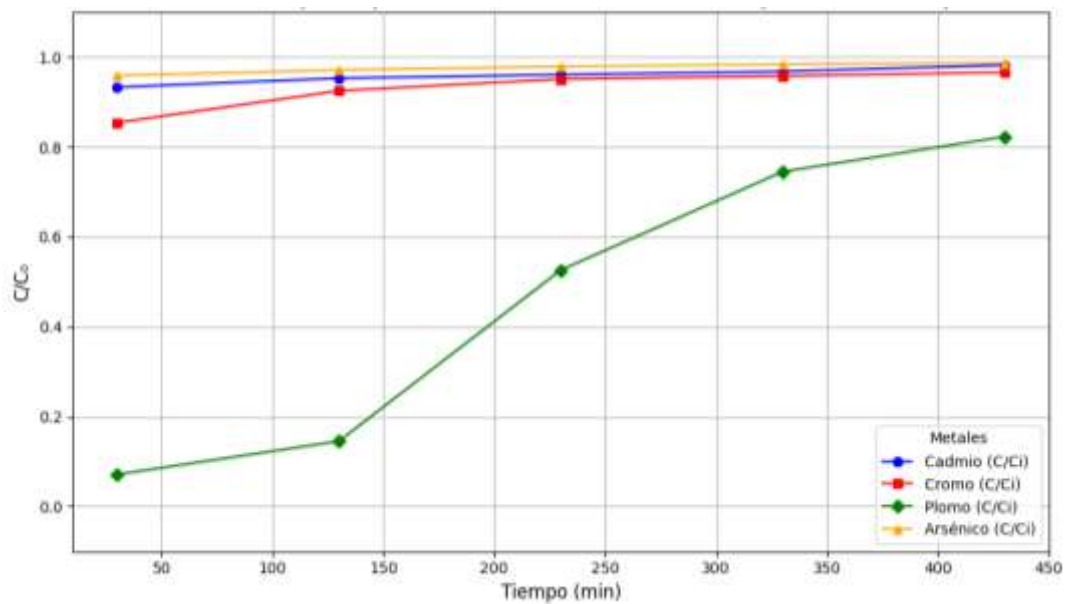


Figura 11

Curva de ruptura para el biofiltro de cálices de *Physalis peruviana* L. 425 μm



El As alcanzó su punto de ruptura en los primeros 30 min en todos los biofiltros evaluados. También fue el metal cuya curva llegó al punto de saturación en los biofiltros de cálices, mientras que el material adsorbente de cáscara de huevo no alcanzó saturación en los 430 min de ensayo, lo que indica una capacidad residual de adsorción no agotada.

En lo que respecta al cumplimiento normativo, solo el biofiltro de cáscara de huevo de 250 μm logró mantener las concentraciones por debajo del límite máximo permisible (LMP) de 0,01 mg/l establecido en el D.S. N°031-2010-SA, hasta los 200 min, mientras que el de 425 μm lo consiguió únicamente hasta los 64 min. El resto de los biofiltros no cumplió con los límites para ningún metal, mostrando la importancia de la granulometría para alcanzar estándares altos de remoción.

Este comportamiento concuerda con lo observado en estudios previos, como el de Olubunmi et al. (2020), quienes reportaron que la mayor remoción de Cd (II) y Cr (VI) usando cáscara de huevo ocurre en los primeros 30 min, un periodo en el que hay una máxima disponibilidad de sitios activos. De forma similar, Ruiz (2012) documentó que los tiempos de ruptura varían considerablemente según el adsorbente. El presente estudio demuestra que la cáscara de huevo de 250 μm ofrece una vida útil excepcionalmente larga para el plomo en comparación con otros materiales.

Tabla 15

Vida útil del lecho (t_R) para cada biofiltro en la remoción de metales pesados

Biofiltro	Metal	t_R (min)
Cáscara de huevo de gallina 250 μm	Cadmio (Cd)	248,83
	Cromo (Cr)	321,25
	Plomo (Pb)	>430
	Arsénico (As)	<30
Cáscara de huevo de gallina 425 μm	Cadmio (Cd)	<30
	Cromo (Cr)	<30
	Plomo (Pb)	>430
	Arsénico (As)	<30
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 250 μm	Cadmio (Cd)	<30
	Cromo (Cr)	<30
	Plomo (Pb)	238,20
	Arsénico (As)	<30
Cálices de <i>Physalis peruviana</i> L. 425 μm	Cadmio (Cd)	<30
	Cromo (Cr)	<30
	Plomo (Pb)	69,19
	Arsénico (As)	<30

Nota. La vida útil del lecho (t_R) se calculó como el tiempo en que la concentración del efluente alcanzó el 10 % de la concentración inicial ($C_0/C_T = 0,1$). Los valores se obtuvieron mediante interpolación lineal de los datos experimentales. La notación >430 indica que la ruptura no se alcanzó al final del experimento, mientras que <30 señala que ocurrió antes de la primera medición.

Las implicancias teóricas de la presente investigación respaldan los resultados de Olubunmi et al., (2020) quienes indican que los tiempos de contacto más favorables para la remoción de metales pesados mediante biofiltros ocurren durante los primeros 30 min, debido a la disponibilidad de sitios activos vacantes, los cuales son progresivamente ocupados por los adsorbatos con el paso del tiempo. En este sentido, los biofiltros elaborados

con cáscara de huevo de gallina de 250 y 425 μm demostraron ser altamente eficientes en la remoción de Pb.

Los biofiltros estudiados muestran potencial para aplicaciones prácticas en la remoción de metales pesados, por su eficiencia y vida útil prolongada especialmente para el Pb. Por lo tanto, podrían ser aplicables en hogares, comunidades rurales o a nivel industrial.

Respecto al enfoque metodológico, el uso de la curva de ruptura en sistemas de lecho fijo fue clave para determinar el punto de ruptura y el punto de saturación, los cuales permiten calcular la vida útil de los materiales adsorbentes.

4.3. Analizar los mecanismos de adsorción de biofiltros elaborado con cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con cadmio (Cd), cromo (Cr, plomo (Pb) y arsénico (As) utilizando los modelos matemáticos: Thomas y de dosis respuesta.

En la Tabla 16 se observa que el coeficiente de determinación (R^2), en ambos modelos se ajusta bien a los datos, con valores generalmente superiores a 0,95. Sin embargo, el modelo de dosis respuesta modificado tiende a proporcionar un mejor ajuste, con valores de R^2 cercanos a 0,99 en todos los casos. Este modelo es particularmente superior para el Pb en la cáscara de huevo de 250 μm , aunque el ajuste en el modelo de Thomas fue más bajo ($R^2 = 0,806$).

Estos hallazgos coinciden parcialmente con la literatura. Por ejemplo, en el estudio de Calero et al. (2012) encontraron que el modelo de dosis respuesta ofrecía un mejor ajuste (R^2 entre 0,95 y 0,99) que el de Thomas ($R^2 = 0,62$) para la biosorción de cobre, lo que sugiere una inconsistencia en la capacidad de los modelos para reproducir el comportamiento

experimental. Por otro lado, Maldonado et al. (2021) y Marín (2017) reportaron que el modelo de Thomas fue más adecuado en sus estudios, con R^2 de 0,96 y 0,99, respectivamente. A su vez Lara et al. (2016) también obtuvieron mejores ajustes con el modelo de Thomas para la adsorción de Cd (R^2 entre 0,77 y 0,99) y Pb (R^2 entre 0,94 y 0,97) utilizando residuos de cacao.

Tabla 16

Parámetros del modelo de Thomas y del modelo dosis respuesta modificado para la biosorción de metales pesados

Tipo de biofiltro	Metal pesado	Modelo de Thomas			Modelo de dosis de respuesta Modificada		
		R^2	q_e, Th (mg/g)	k_{Th} (ml/min·m g)	R^2	a	b
Cáscara de huevo de gallina 250 μ m	Cadmio (Cd)	0.981	399.78	0.00206	0.997	0.015	1.15
	Cromo (Cr)	0.997	158.46	0.00713	0.987	0.006	1.48
	Plomo (Pb)	0.806	5.86	0.28710	0.989	0.0003	2.50
	Arsénico (As)	0.999	42.27	0.01520	0.997	0.001	1.95
Cáscara de huevo de gallina 425 μ m	Cadmio (Cd)	0.992	185.73	0.00350	0.998	0.001	1.83
	Cromo (Cr)	0.921	144.15	0.00240	0.966	0.004	1.63
	Plomo (Pb)	0.992	196.22	0.00260	0.997	0.00003	3.01
	Arsénico (As)	0.990	120.35	0.00610	0.997	0.0004	2.22
Cálices de <i>Physalis</i> <i>peruviana</i> L. 250 μ m	Cadmio (Cd)	0.995	3.51	0.40790	0.998	0.0000005	4.88
	Cromo (Cr)	0.995	3.32	0.43400	0.998	0.0000004	4.90
	Plomo (Pb)	0.977	118.89	0.00890	0.998	0.0000003	4.98
	Arsénico (As)	0.953	2.45	0.88090	0.998	0.0000002	5.12
Cálices de <i>Physalis</i> <i>peruviana</i> L. 425 μ m	Cadmio (Cd)	0.992	2.65	0.58900	0.997	0.0000004	4.95
	Cromo (Cr)	0.997	2.58	0.59800	0.997	0.0000004	4.96
	Plomo (Pb)	0.990	114.93	0.00760	0.997	0.00000004	5.48
	Arsénico (As)	0.992	2.51	0.61300	0.997	0.0000002	5.21

Nota. Parámetros cinéticos obtenidos a partir de los modelos de Thomas y dosis respuesta modificado. R^2 : es el coeficiente de determinación. q_e, Th : es la capacidad de adsorción de equilibrio (mg/g) y k_{Th} es la constante de velocidad del modelo de Thomas (ml/min.mg); a y b son los parámetros del modelo de dosis respuesta modificado.

Las diferencias en los resultados de los modelos se deben a las condiciones experimentales específicas de cada investigación, como el tipo de biomasa, la concentración inicial de metales, el pH y las características del sistema de lecho fijo. En este estudio, el modelo de dosis respuesta modificado se ajusta mejor, esto puede deberse a que la cinética de adsorción en los sistemas de biofiltros evaluados se describe con mejor precisión mediante los parámetros considerados en este estudio.

Para el Cd, el biofiltro de cáscara de huevo de 250 μm presentó una capacidad máxima (q_e, Th) de casi 400 mg/g, un valor que es más del doble de la capacidad que en la granulometría de 425 μm (185,73 mg/g). Esta diferencia muestra la importancia del tamaño de la partícula en la adsorción de este metal, probablemente se deba a la mayor exposición a sitios activos.

Para el Pb, el modelo de Thomas aplicado a la cáscara de huevo de 250 μm no se ajustó a los datos experimentales, lo que nos lleva a confiar más en el modelo de dosis respuesta modificado. Este último, al igual que los datos del modelo de Thomas para la cáscara de huevo de 425 μm (q_e, Th), mostraron una alta capacidad predictiva para el Pb, confirmando las altas eficiencias observadas en los experimentos.

En el caso del Cr, las cáscaras de huevo demostraron una gran capacidad de adsorción, estimada por el modelo de Thomas (q_e, Th) de 158,46 mg/g y de 144,15 mg/g para las granulometrías de 250 y 425 μm respectivamente. Estos valores son altos y demuestran un gran potencial de la cáscara de huevo. A diferencia de los cálices que mostraron una capacidad de adsorción extremadamente baja para el Cr, con valores de q_e, Th apenas superiores a 3 mg/g.

Con respecto al As, ningún biofiltro mostró ser adecuado. A pesar de que los modelos se ajustan bien a los datos, la capacidad de adsorción estimada (q_e, Th) para este metal es muy

baja en todos los materiales, lo que explica por qué la remoción fue tan ineficaz en el experimento.

Las constantes de velocidad de Thomas (k_{Th}) para la cáscara de huevo fueron relativamente bajas, lo que indica que, si bien el proceso de adsorción es muy eficiente, ocurre a una velocidad moderada.

En contraste, los biofiltros elaborados con cálices de *Physalis peruviana* L. mostraron baja capacidad de adsorción para todos los metales (q_e, Th entre 2,45 y 118 mg/g). A pesar de que sus constantes de velocidad (k_{Th}) son muy altas, esto puede deberse a que la adsorción inicial es muy rápida, seguida de una saturación casi inmediata. Esta limitación explica por qué la eficiencia de estos biofiltros disminuyó drásticamente en un corto periodo, tal como se observó en las curvas de ruptura. La capacidad moderadamente alta para el Pb en este modelo es probablemente una sobreestimación del valor real.

Este estudio contribuye al desarrollo teórico demostrando que el uso de modelos matemáticos ayuda a validar y cuantificar el rendimiento de un material. Los resultados de los modelos de Thomas y dosis respuesta modificado demuestran que la capacidad de adsorción (q_e) y la cinética (k_{Th}) son propiedades intrínsecas de la biomasa y de su granulometría. Los resultados permiten destacar el rendimiento del biofiltro de cáscara de huevo de 250 μm y menor rendimiento para los biofiltros elaborados con cálices de *Physalis peruviana* L.

La utilidad práctica del estudio indica que los modelos matemáticos permiten diseñar y calcular la escalabilidad de un sistema de tratamiento de aguas. Ya que los valores de q_e nos permiten determinar la vida útil del biofiltro y la cantidad de biomasa necesaria para tratar un volumen de agua específico.

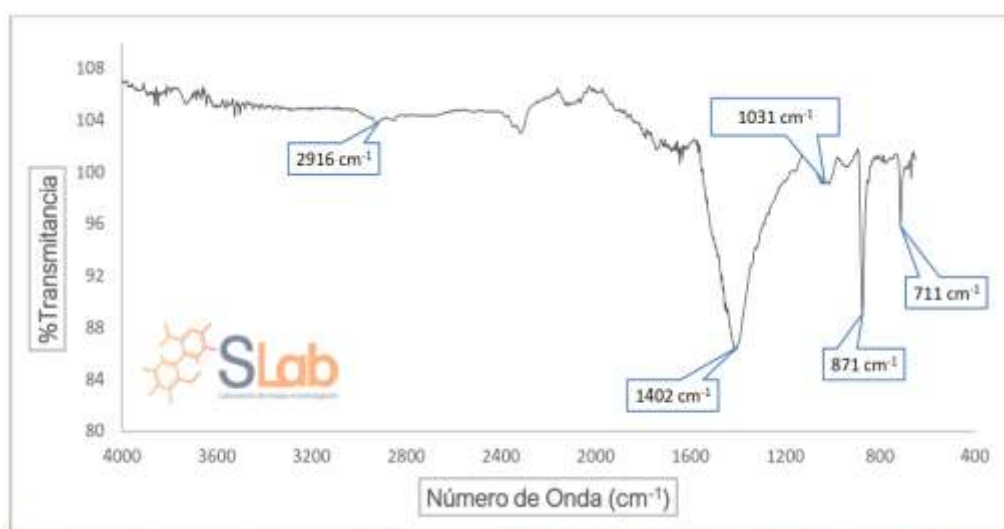
Metodológicamente, los modelos aplicados permitieron conocer la dinámica del sistema, siendo el modelo de dosis respuesta modificado el que mejor ajustó tuvo a nuestros datos experimentales. Los modelos resultan replicables y constituyen una herramienta útil para comparar la eficiencia de distintos biofiltros.

4.4. Composición química y los grupos funcionales de los residuos de cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. mediante espectroscopia infrarroja para identificar sitios de adsorción potenciales de metales pesados.

La participación de los grupos funcionales en el proceso de adsorción de iones metálicos está bien documentada en la literatura (Duany et al., 2022). En este sentido, se realizaron análisis de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR) a la biomasa de la cáscara de huevo y de los cálices de *Physalis peruviana* L. para identificar a los grupos funcionales claves responsables de la remoción de metales.

Figura 12

Espectro FTIR-ATR de la cáscara de huevo de gallina antes de la adsorción de iones metálicos

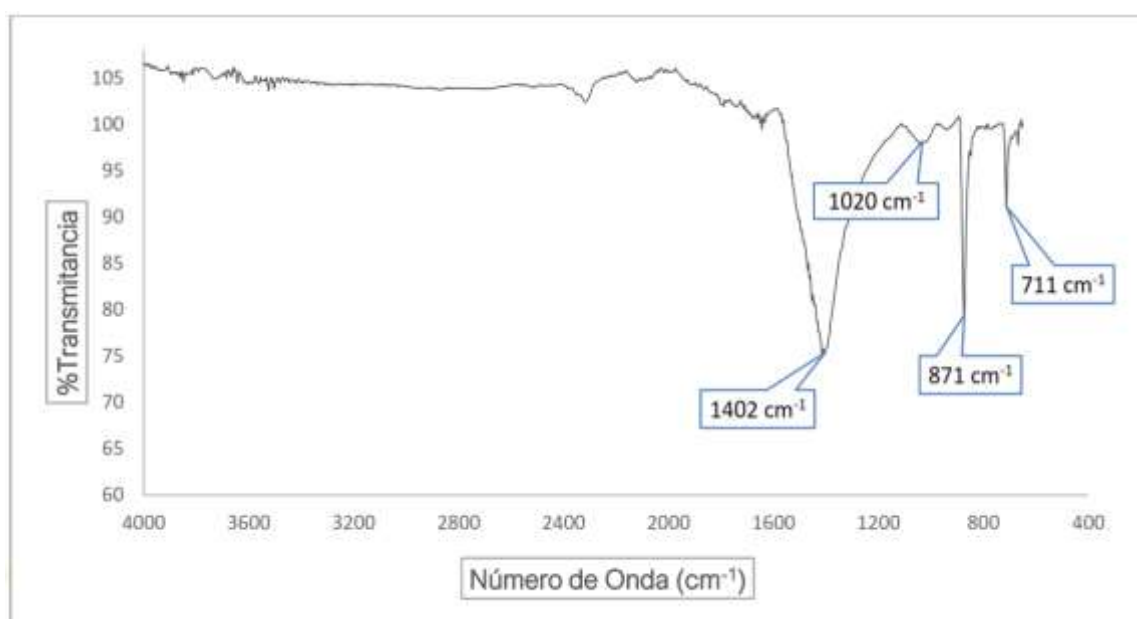


Nota. Análisis de laboratorio del espectro infrarrojo de la cáscara de huevo para conocer sus grupos funcionales antes del experimento.

El análisis de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) realizado en la cáscara de huevo antes de la biosorción (Figura 12) confirmó la presencia de enlaces de carbonato (CO_3^{2-}) identificados por las bandas en vibración en 1402 cm^{-1} y 871 cm^{-1} . Estos corresponden al principal componente inorgánico de la cáscara de huevo. Además, se identificaron bandas asociadas a enlaces (C–H) a 2916 cm^{-1} .

Figura 13

Espectro FTIR-ATR de la cáscara de huevo de gallina después de la adsorción de iones metálicos



Nota. Análisis de laboratorio del espectro infrarrojo de la cáscara de huevo para conocer sus grupos funcionales después del experimento.

Tras la biosorción de metales (Cd, Cr, Pb y As), se observaron cambios en los espectros que evidencian una interacción entre los metales pesados y la superficie del biofiltro. La banda del enlace C–O ubicado en 1031 cm^{-1} mostró un desplazamiento leve a 1020 cm^{-1} . Este cambio significaría que los metales pesados se unieron a los grupos funcionales C–O, afectando su vibración.

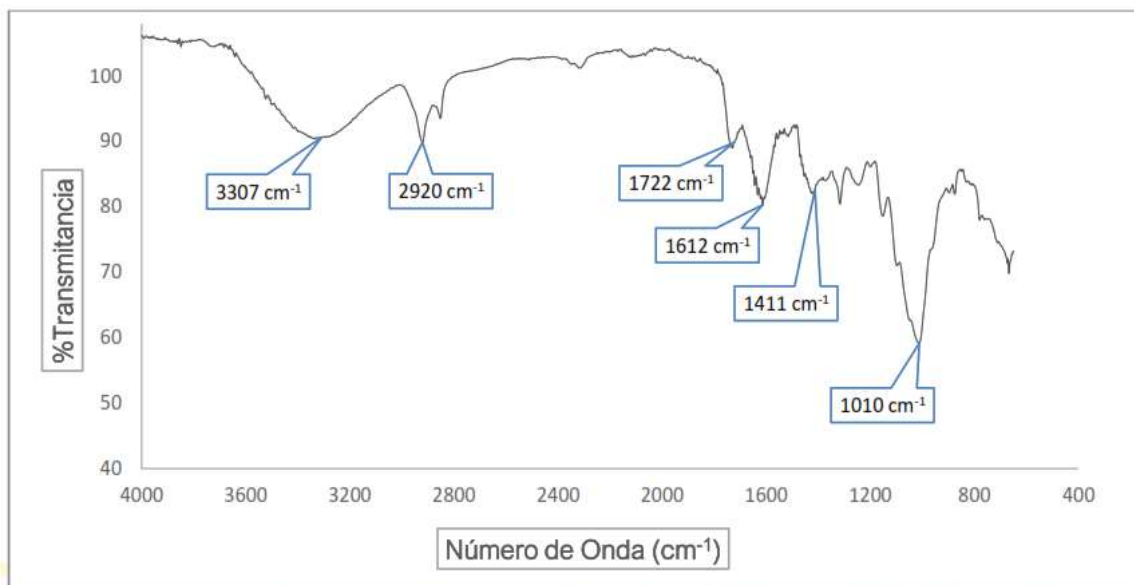
La disminución de la intensidad de los picos de vibración del espectro FTIR, particularmente aquellos asociados a los enlaces C–H y C–O, sugiere que los grupos funcionales orgánicos son los principales sitios activos involucrados en el proceso de biosorción de metales pesados (Maldonado et al., 2021). Este cambio se interpreta como una interacción química entre el catión metálico y los grupos funcionales, donde el ión, al ser más voluminoso, impide la vibración natural de los enlaces, lo que se traduce en una reducción de la intensidad del pico (Ruiz, 2012).

La evidencia del espectro FTIR, respalda la hipótesis de que el mecanismo de remoción del catión metálico se lleva a cabo a través de un intercambio iónico (Tejada et al., 2015). La presencia de carbonatos de calcio proporciona un entorno ideal para que los iones metálicos como el Pb, Cr y As sean adsorbidos.

Se observa que las bandas de carbonato persisten después de la biosorción, lo cual indica que, si bien estos grupos participan en el proceso, el mecanismo no se limita a su simple degradación. Este hallazgo coincide con los estudios previos que han demostrado que la interacción de biomoléculas carbonatadas con metales pesados se da a través de una complejación o atracción electrostática, sin que las bandas desaparezcan por completo (Annane et al., 2021).

Figura 14

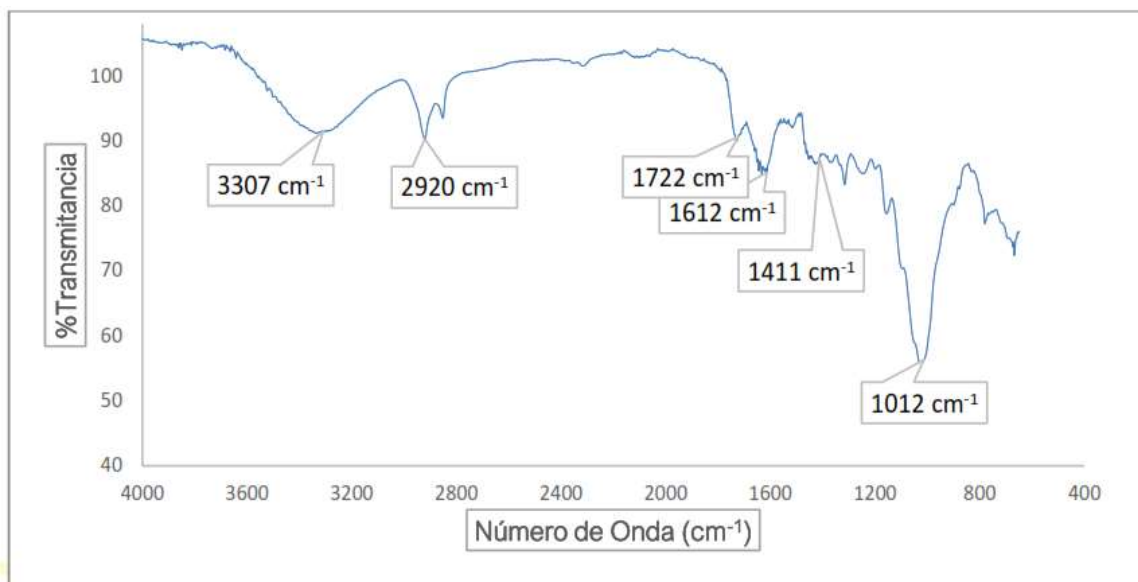
Espectro FTIR-ATR de los cálices de Physalis peruviana L. antes de la adsorción de iones metálicos



Nota. Análisis de laboratorio del espectro infrarrojo del cálize de *Physalis peruviana L.* para conocer sus grupos funcionales antes del experimento.

Figura 15

Espectro FTIR-ATR de los cálices de Physalis peruviana L. después de la adsorción de iones metálicos



Nota. Análisis de laboratorio del espectro infrarrojo del cálize de *Physalis peruviana L.* para conocer sus grupos funcionales después del experimento.

El espectro FTIR de los cálices de *Physalis peruviana* L. muestra la presencia de grupos funcionales claves en la adsorción de metales, como el O–H (3307 cm^{-1}), C–H (2929 cm^{-1}), C=O (1722 cm^{-1}), CO_3^{-2} (1411 cm^{-1}) y el grupo C–O (1010 cm^{-1}). La presencia de estos grupos funcionales coincide con los hallazgos de Lavado et al., (2023), quienes los identifican como característicos de materiales lignocelulósicos similares.

Un hallazgo importante es la banda de carbonato (CO_3^{-2}) persistente después del proceso de biosorción, lo cual coincide con estudios que han demostrado la capacidad de las biomoléculas carbonatadas para capturar metales pesados sin perder su estructura fundamental (Annane et al., 2021). Esta evidencia sugiere que, si bien este grupo participa en el proceso, el mecanismo de remoción no se limita a su degradación. De manera similar la participación del grupo C–O en el proceso de adsorción se ve reflejada en el espectro, donde el pico 1010 cm^{-1} se desplaza a 1012 cm^{-1} . Este desplazamiento en el número de onda indica una interacción activa con iones metálicos, un comportamiento respaldado por la literatura que identifica al enlace C–O como esencial en la biosorción de metales pesados (Arizpe et al., 2025).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El propósito principal de este estudio fue evaluar la eficiencia de los biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. en el tratamiento de agua con metales pesados. Los resultados indican que ambos materiales logran remover metales pesados. Sin embargo, el material de cáscara de huevo de gallina con granulometría de 250 μm fue más efectivo en la adsorción de plomo (Pb), cromo (Cr) y cadmio (Cd). Con excepción del arsénico (As) que no alcanzó los niveles adecuados de remoción en ningún biofiltro. Esta investigación muestra el potencial que tienen los biorresiduos como biofiltros. Se recomienda ampliar el estudio evaluando la eficiencia de estos materiales con aguas residuales reales, a fin de validar su aplicabilidad en condiciones ambientales más complejas.

Este trabajo tuvo como objetivo específico modelar el rendimiento cinético y la durabilidad de los biofiltros de lecho fijo elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. para el tratamiento de agua contaminada con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As). Los resultados mostraron que la de cáscara de huevo de gallina de 250 μm , tiene una capacidad mayor para adsorber plomo (Pb), al no alcanzar su punto de ruptura durante los 430 min que duró el experimento. Por el contrario, los demás biofiltros alcanzaron su punto de ruptura por debajo de los 330 min, especialmente en la remoción de cromo (Cr), cadmio (Cd) y arsénico (As). Estos datos, muestran la importancia de la granulometría en los materiales absorbentes. Para confirmar la viabilidad de estos biofiltros, se sugiere evaluar su rendimiento en sistemas de flujo continuo a tiempos superiores a los 430 min que duró esta investigación. Además, se recomienda explorar la viabilidad de la regeneración de la biomasa saturada para su reutilización.

El segundo objetivo específico fue analizar los mecanismos de adsorción de biofiltros elaborados con cáscara de huevo de gallina y cálices de *Physalis peruviana* L. para el tratamiento de agua contaminada con cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y arsénico (As), utilizando los modelos matemáticos de Thomas y de dosis respuesta modificada. El modelo de dosis respuesta modificado mostró un mejor ajuste para describir la cinética de adsorción en sistemas de flujo continuo con un coeficiente de determinación (R^2) entre 0,96 y 0,99; lo que proporciona un marco sólido para el diseño y escalamiento de esta tecnología. Con la finalidad de profundizar en los mecanismos de adsorción y su aplicación práctica, se recomienda investigar los sistemas de biosorción multicomponentes ya que la presencia de múltiples iones metálicos en la solución podría afectar la eficiencia de la remoción.

El último objetivo fue analizar la composición química y los grupos funcionales de los residuos de cáscara de huevo y cálices de *Physalis peruviana* L. mediante espectroscopia infrarroja para identificar sitios de adsorción potenciales de metales pesados. En el caso de la cáscara de huevo de gallina, el análisis por FTIR confirmó que la capacidad de adsorción se debe a la interacción de los metales pesados con los grupos carbonatos y los óxidos de calcio en su superficie. Por su parte, la biomasa de *Physalis peruviana* L. demostró tener un mecanismo de remoción distinto, pero igualmente efectivo. La participación de los grupos funcionales se evidenció en el desplazamiento del pico C–O lo que confirma la interacción de este grupo con iones metálicos. Además de la persistencia de la banda de CO_3^{2-} después del tratamiento indica que el mecanismo de remoción no se limita a su degradación, lo que califica a la biomasa como un bioadsorbente prometedor en el tratamiento de aguas. En futuros estudios se puede analizar la superficie de las biomasas con espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS).

RECOMENDACIONES

En base a los resultados del presente estudio se sugiere:

- Continuar con la investigación utilizando cálices de *Physalis peruviana* L. y cáscaras de huevo de gallina como biofiltros, optimizando las condiciones operativas, como el pH, el caudal, la cantidad de biomasa y el tamaño del material, con la finalidad de maximizar la eficiencia en la remoción de metales pesados.
- Realizar ensayos experimentales utilizando filtros continuos que combinen ambos materiales.
- Evaluar el impacto de la compactación del lecho en el tiempo.
- Realizar pruebas con otros tipos de residuos orgánicos o incluso con otro tipo de contaminantes.

REFERENCIAS

- Acosta I., Moctezuma M., Cárdenas J., y Conrado (2007). Bioadsorción de Cadmio (II) en Solución Acuosa por Biomasa Fúngicas. *Información Tecnológica*, 18(1), 9-14. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v18n1/art03.pdf>
- Adriano, D. C. (2001). Oligoelementos en entornos terrestres: Biogeoquímica, biodisponibilidad y riesgos de los metales (2.^a ed). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Agraria. (2023, enero 3). Producción de huevo por parte de Perú alcanzó las 503.080 toneladas en 2023. *Agraria.pe*. <https://agraria.pe/noticias/produccion-de-huevo-por-parte-de-peru-alcanzo-las-503-080-to-37287>
- Alegre, A., y Gutiérrez, S. (2021). Remoción de Cadmio y Plomo en un Efluente Minero de Ticapampa-Recuay, Ancash con biomasa seca de *Serratia Marcescens* M8a-2t. *Anales Científicos*, 82 (2), 336-345. <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/1788/2318>.
- Almenares, J., Ngoma, F., y Serrat, M. (2011). Aspectos Tecnológicos Generales para la Conversión a Etanol de la Biomasa Lignocelulosa II. *Tecnología Química*, 31(3), 392-407. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v31n3/rtq12311.pdf>
- Añibarro, M., Dias, M., Petrovic, J., Mandim, F., Nuñez, S., Sokovic, M., López, V., Barros, L. y Pinela, J. (2025). Nutrientes, fitoquímicos y actividades biológicas in vitro del fruto y cáliz de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Plants*, 14 (3), 327; <https://doi.org/10.3390/plants14030327>
- Annane, K., Lemlikchi, W., y Tingry, S. (2021). Eficiencia de la cáscara de huevo como adsorbente de bajo costo para la eliminación de cadmio: Estudios cinéticos e isotérmicos. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(13), 6163–6174. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01619-2>
- Asma, A., Shazma, M., Muhammad, B., Sajid, R., Asim, J., Javed, I., Abdullah, G., Abul, K., y Samia, F. (2022). Synthesis and Application of Egg Shell Biochar for As(V) Removal from Aqueous Solutions. *Catalysts*, 12(4), 431-444. <https://doi.org/10.3390/catal12040431>

- Arizpe, D., Gama, S., Roa, G., Vilchis, A., Parada, A., y Balderas, P. (2025). Evaluación de la eliminación de cadmio en una solución acuosa mediante biosorción en un sistema discontinuo con cáscaras de plátano, maní y naranja. *Environments*, 12 (4), 97, <https://doi.org/10.3390/environments12040097>
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2021). *El agua en cifras*. <https://www.ana.gob.pe/contenido/el-agua-en-cifras>.
- Baray, M., Porras, D., Hoffmann, H., y Manjarrez, C. (2019). Tratamiento de la biomasa lignocelulósica mediante la pirolisis lenta y a baja temperatura para la producción de biocombustibles. *Revista de Energías Renovables*, 3 (9), 1-9.
DOI: 10.35429/JRE.2019.9.3.1.9
- Bedoya-Betancur, S.A., Arriola-Villaseñor, E., Valencia-González, J. D., Ortiz-Muñoz, D. A., Barrera-Zapata, R., Hernández-Camacho, J. A., y Ardila-Arias, A. N. (2023). Adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. *Revista Ion*, 36(2), 15-32.
doi:10.18273/revion.v36n2-2023002
- BIOPAT/PERU. (2015). Comisión Nacional contra la Biopiratería: Aguaymanto. https://repositorio.indecopi.gob.pe/bitstream/handle/11724/4357/879_DIN_BIOPAT_01-2015_Aguaymanto.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Boucher, François, & Desjardins, Denis Requier. (2005). La concentración de las queserías rurales de Cajamarca: retos y dificultades de una estrategia colectiva de activación. *Agroalimentaria*, 10(21), 13-27.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542005000200001&lng=es&tlng=es
- Brazesh, B., Mojtaba, S., Zarei, M., Ghaedi, M., Bahrani, S., y Hashemi, A. (2021). Biosorción. *Interface Science and Technology*. 3, 587-628.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00003-5>
- Broche, M., Rodríguez, I., Cosa, Y., y Calero, M. (2018). Caracterización de los Residuos Agrícolas de Sorgo para su uso como Material Biosorbente de Colorantes. *Revista Centro Azucar*, 45 (1), 64 – 75. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v45n4/caz07418>.

- Calero, M., Blázquez, G., Hernáinz, F., Ronda, A., y Martín, M. (2012). Biosorción de cobre con corteza de pino en columna de lecho de fijo: optimización de las variables del proceso. *Afinidad*, 69(559), 175-184. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/268451>
- Calvo, J., Pelegrín, A., y Saturnina, M. (2018). Enfoques teóricos para la evaluación de la eficiencia y eficacia en el primer nivel de atención médica de los servicios de salud del sector público. *Retos de la Dirección*, 12(1), 96-118. <http://scielo.sld.cu/pdf/rdir/v12n1/rdir06118.pdf>
- Cañizares, R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42, 131-143. <https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf?q=metales>
- Cardona, A., Cabañas, D., y Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 17(1), 1-9. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46729718001.pdf>
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D. y Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Una Revisión. Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90. Dialnet-TratamientosParaLaRemocionDeMetalesPesadosComunmen-5432290%20(3).pdf
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS]. (2005). Especificaciones Técnicas para Construcción de Sistemas de Filtración de Múltiples Etapas. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005a.%20Esp.%20tecn.%20para%20construcci%C3%B3n%20sist.%20filtraciones%20m%C3%BAltiples.pdf
- Dávila, P., Mendoza, S., Mendoza, V., Patiño, V., Pinzón, J., Gil, P., y Rondón, D. (2016). Biosorción de metales pesados. *Latin American Journal of Science Education*, 1(12008), 1–10. http://www.lajse.org/may16/12008_Davila_2016.pdf
- Dávila, T., Efredid, N., Ordoñez, D., Muñoz J., y Benítez R. (2017). Evaluación de residuos agroindustriales como biofiltros: Remoción de Cr (VI) en efluentes de curtiembres

sintéticos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, (Edición especial), 49-58. doi: [http://dx.doi.org/10.18684/BSAA\(Edición Especial\)49-58](http://dx.doi.org/10.18684/BSAA(Edición Especial)49-58)

Duany, S., Arias, T., Bessy, T., y Rodríguez, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. *Revisión. Tecnología Química*, 42 (1), 94-113. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094

Escobar, M., Lobo, G., Maza, M., Pineda, A., Velásquez, L., Romero, L., and De la Rosa, M. (2012) Evaluación del uso de cáscara de huevo como sustrato adsorbente para la remoción de cromo (VI) en solución acuosa. *Revista del colegio de médicos veterinarios del Estado Lara*, 8(2), 36–43. <https://www.redalyc.org/journal/707/70757668008/html/>

Espinosa, M., Hidalgo, A., Delgado, R., Olivera, I., y Bernal, L. (2020). Adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (*Byrsonima crassifolia*). *Revista Colombiana de Química*, 49(2), 30–36. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v49n2.80633>.

Gobierno Regional de Cajamarca (24 de enero de 2025). *Más de 2 mil 500 hectáreas de frutales se registran en la cuenca del Jequetepeque*. <https://www.regioncajamarca.gob.pe/portal/noticias/det/10182>

Hee-Jeong, C. (2019). Evaluación de la cinética de adsorción, el equilibrio y la termodinámica para la eliminación de Pb(II) utilizando un adsorbente híbrido de bajo costo para residuos biológicos, cáscara de huevo/café molido/sericita. *Water Environment Research*, 91(12), 1600–1612. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31188507/>

Hernández, R., Garzón, J., La Rotta, M., y Guerra, J. (2017). Evaluación de la capacidad de bioadsorción de plomo (II) presente en afluentes sintéticos, utilizando bioadsorventes de origen vegetal. *Publicaciones e Investigación*, 12 (1), 101-111. <http://oaji.net/articles/2020/5082-1596484345.pdf>.

Higuera, O., Arroyave, J., y Flórez, L. (2008). Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros. *Dyna*, 76(160), 107–119. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n160/a10v76n160.pdf>

- Huamán, J., Blas, W., Zavaleta, G., Saldaña, J., Vásquez, K., Hoyos, R., Tafur, K., Rodríguez, C., Rodríguez, D., y Tisnado, Z. (2020). Toxicidad del decocto de cálices de *Physalis peruviana* L. (Solanaceae) “aguaymanto” sobre larvas del tercer estadio de *Artemia salina*. *Arnaldoa*, 27(2), 561-570. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.272.27208>
- Instituto de Estudio del Huevo (2022). Estructura del Huevo. https://www.institutohuevo.com/estructura_huevo/
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2017). Directorio Nacional de Centros Poblados. Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm
- Izquierdo Sanchis, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10803/52130>
- Kayranli B. (2022). Mecanismos de eliminación de cadmio de una solución acuosa mediante el uso de lignocelulosas recicladas. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 443-457. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.036>
- Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., y Arrieta, A. (2016). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revion*, 29 (2), 111-122. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>
- Lavado, C., y Oré, F. (2016). Estudio de la biosorción de plomo divalente de soluciones acuosas usando biomasa modificada de marlo de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(4), 403–414. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v82n4/a03v82n4.pdf>
- Lavado, C., Fernandez, M., Gamarra, F., Sacari, E., Ángeles, J. y Dávalos, J. (2023). Eliminación simple y binaria de Pb(II) y Cd(II) con cladodios de *Opuntia ficus indica* modificados químicamente. *Molecules*, 28(11):4451. doi: 10.3390/molecules28114451

- Liu, Y., Serrano A., y Villa, D. (2021). Biological treatment of water impacted by mines in the context of metal recovery. En *M. G. Resource recovery from mine waste*, 26, 499–522). <https://www.researchgate.net/profile/Denys-Villa/publication/351950730>
- Liu, Z., Li-ao, W., Xiao, H., Guo, X., Urbanovich, O., Nagoraskaya, L. y Li X. (2020). Una revisión de los factores de control de la tecnología de pirólisis para plantas que contienen metales pesados. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191, 110-181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110181>
- Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14 (2), 145-153. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
- Makuchowska-Fryc, J. (2019). Uso de las cáscaras de huevo en la eliminación de metales pesados de aguas residuales: Cinética y eficiencia del proceso. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(1), 165–174. <https://doi.org/10.1515/eces-2019-0012>
- Maldonado, A., Fernández, U., Salas, H., Guillen, M., y Medrano, E. (2021). *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. 1-9. https://www.laccei.org/LACCEI2021-VirtualEdition/full_papers/FP581.pdf
- Mamani, W., Ramiro, W., De la Cruz, D., Zea, N., Salas, R., Mamani, D., y Sucapuca, R. (2019). Adsorción de metales pesados de aguas residuales de la mina Lunar de Oro con carbón activado de lenteja de agua (*Lemna Gibba* L.) *Ñawparisum*, 1(2), 13-20. <http://unaj.edu.pe/revista/index.php/vpin/article/view/27>
- Marín Allende, M. (2017). Comportamiento químico y simulación numérica del Cr(VI) en sorbentes porosos de origen natural: caña de maíz y bagazo de agave en sistemas estáticos y dinámicos. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=372096&orden=0&info=link>
- Marín, T., y Arriojas, D. (2020). Remoción de turbidez de agua mediante filtración utilizando cáscara de coco (*Cocos nucífera*) a nivel de laboratorio. *Revion*, 33(2), 99–110. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020008>
- Marín, T., Heredia, V., y Alcarraz, M. (2019). Filtro de cascarilla de *Ricinus communis* y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: Diseño de un

sistema en serie por etapas. *Ingeniería del Agua*, 23(3), 187–198.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/10074/11274>

Mashangwa, TD, Tekere, M. y Sibanda, T. (2017). Determinación de la eficacia de la cáscara de huevo como adsorbente de bajo costo para el tratamiento de efluentes cargados de metales. *Revista Internacional de Investigación Ambiental*, 11, 175-188.
DOI: 10.1007/s41742-017-0017-3

Ministerio de Agricultura y Riego [MINAGRI]. (2021). *Preguntas frecuentes: Aguaymanto*.
<https://www.minagri.gob.pe/portal/32-sector-agrario/frutas>.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2005, 15 de octubre). *Ley General del Ambiente N°28611*. *Diario Oficial El Peruano*.
<https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>.

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2008, 14 de mayo). *Decreto Supremo N° 037-2008-PCM. Establecen Límites Máximos Permisibles de Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburos*.
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/1455.pdf>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2010, 21 de agosto). *Decreto Supremo N°010-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades Minero-Metalúrgicas*.
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_010-2010-minam.pdf

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2017, 7 de junio). *Decreto Supremo N°004-2017-MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*.
<https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2023). *Esto debes saber sobre los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos aprovechables*.
https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/763484-esto-debes-saber-sobre-los-residuos-solidos-organicos-e-inorganicos-aprovechables?utm_source=chatgpt.com

- Ministerio de Salud [MINSA]. (2010, 24 septiembre). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA. Diario Oficial El Peruano*.
<http://sial.segat.gob.pe/normas/aprueban-reglamento-calidad-agua-consumo-humano>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS]. (2006). *Norma OS.090 Plantas De Tratamiento de Aguas Residuales*.
https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/saneamiento/OS.090.pdf
- Municipalidad Provincial de Cajamarca (2022). *Plan de Operaciones de Emergencia de la Provincia de Cajamarca 2022-2023*.
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3859833/PlanPOE-2022-2023_pdf.pdf
- Olubunmi, G., Peter, A., Babalola, A., Kelvin, A., Vincent, E., y Faisal, A. (2020). Rendimiento del polvo de cáscara de huevo como adsorbente para la adsorción de cromo hexavalente y cadmio de aguas residuales. *Springer nature*. 2, 1996, 1-13.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03866-w>
- Oré, F., Lavado, C., y Bendezú, S. (2015). Biosorción de Pb (II) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 122-134. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v81n2/a05v81n2.pdf>
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). *La Contaminación del Suelo: Una Realidad Oculta. Roma*.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/7d70ca8d-7503-4839-8d6b-8250e9add8ac/content>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2006). *Guías para la calidad del agua potable: primer apéndice a la tercera edición, Volumen 1: Recomendaciones*. Ginebra: OMS.
<https://sswm.info/es/node/11307>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano (4.ª ed. que incorpora la primera adenda)*.
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *Recursos sobre el agua*.
<https://www.who.int/topics/water/es/>

- Pabón, S., Benites, R., Sarria, R. y Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Ciencia e Ingeniería*, 14(27) 9-18.
<https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/1734>
- Payán Gómez, S. (2016). *Estudio y diseño de biofiltro a partir de materia orgánica para el tratamiento de agua*. [Tesis doctoral, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.].
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/583/1/Tesis%20Sergio%20Arturo%20Pay%C3%A1n%20G%C3%B3mez.pdf>
- Pérez, G., Guzmán, J., Durán, K., Ramos, J., y Acha, V. (2018). Aprovechamiento de las cáscaras de huevo en la fortificación de alimentos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 16(18), 29-38. <http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v16n18/a03v16n18.pdf>
- Prieto, J., Gonzales, C., Román, A., y Prieto, F., (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29 -44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Qiong, W., Cong, Z., Yin, K., y Min, Y. (2020). Removal of hexavalent chromium in aquatic solutions by pomelo peel. *Water Science and Engineering*. 13(1), 65-73.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237019301322?via%3Dihub#sec2>
- Quiñones, E., Tejada, C., y Ruiz, V. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Revista Ciencias e Ingeniería al Día*, 9(1), 25-42.
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/5202/Remedacion%20de%20aguas%20contaminadas.pdf>
- Quispe Huacles, P. (2023). *Producción de aguaymanto (Physalis Peruviana. L) y perspectivas de procesamiento en angaraes*.
<https://repositorio.udea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/da95960e-3bb2-44eb-a1a8-4467b21ee434/content>

- Ramón, C., Narajas, J., Pérez, G., Hernández, M. y Díaz, L. (2019). Adsorción de cobre (II) y cadmio (II) en suspensiones acuosas de CaCO_3 biogénico nanoestructurado. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(1), 2-13.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317518300451#sec0045>
- Rangel, E., Montañez, L., Luévanos, M., y Balagurusamy N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33, 103-118. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n2/2395-8030-tl-33-02-00103.pdf>
- Real Academia Española [RAE] (2018). *Diccionario de la Lengua Española*.
<http://www.rae.es/>
- Revelo, D., Pérez, E., y Maya, M. (2019). Evaluación de la capacidad de adsorción selectiva de cáscaras de huevo ante compuestos azufrados para purificación de agua potable. *Revista de Ciencias*, 22(19), 77-85. <https://doi.org/10.25100/rc.v23i2.8423>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., y González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16 (2), 66-77.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rincones, F., Marfisi, S., Danglad, J., y Salazar, V. (2015). Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada con bagazo de caña de azúcar. *Saber*, 27(3), 441-453. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427743080010>
- Ríos, J., y Castellar, G. (2013). Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (66), 141-158.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n66/n66a12.pdf>
- Rodríguez, A., Pacheco, N., Cárdenas, J., Tovar, J., Martínez, V., y Acosta, I. (2017). Bioadsorción de cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa de amaranto (*Amaranthus caudatus*). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8(2), 11-20.
<https://www.redalyc.org/pdf/3236/323652282002.pdf>
- Romero Cano, L. (2018). Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cáscaras de frutas para su uso en la remoción de metales y aplicación a procesos

ambientales. [Tesis doctoral, Universidad de Granada].
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=142240>

Ruiz Granada, D. (2012). Aprovechamiento de Residuos Vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción. [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=62297>

Salas, G., y Effio, W. (2020). Tiempo de Contacto y pH de la Cáscara de Granadilla (*Passiflora ligularis* L.) en la Biosorción de Zinc en Aguas Contaminadas del Rio Grande. *18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology* http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/full_papers/FP163.pdf

Salmon, L., Parían, I. y Chirinos, D. (2015). Acción humectante del extracto del cáliz del aguaymanto (*Physalis Peruviana*) en formulaciones cosméticas. *I+i Investigación Aplicada e Innovación*, 9, 22-27.
<https://www.tecsup.edu.pe/sites/default/files/page/file/revista/Volumen-9/Art-3.pdf>

Sánchez, J., Gonzales, R., Blancas, F., y Fonseca, A. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, (23), 1-18.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261>

Santillán, L., Puente, C., y Osorio, M. (2019). Determinación de la reducción de concentración de Cr^{+6} en muestras de agua de la curtiembre el nuevo mundo en la ciudad de Ambato utilizando la cabuya como biofiltro a diferentes longitudes, *Ciencia Digital*, 3(2.4), 73-87. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.4.509>

Tejada, C., Montiel, Z., y Acevedo, D. (2016). Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb(II). *Información Tecnológica*, 27 (1), 9-20. 10.4067/S0718-07642016000100003.

Tejada, C, Villabona, A., Álvarez, G., Jattin, L., y Granados, C. (2017). Influencia de la altura del lecho sobre el comportamiento dinámico de columna de lecho fijo en la biosorción de mercurio. *Tecno Lógicas*, 20(40), 71-81.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992017000300006.

- Tejada, C., Villabona, Á., & Garcés, L. (2014). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18(34), 109-123.
<http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n34/v18n34a10.pdf>
- Tejada, C., Villabona, Á., & Núñez, J. (2015). Uso de biomásas para la adsorción de plomo, níquel, mercurio y cromo. *Ingenium*, 9 (24), 41-51.
<https://repositorio.usc.edu.co/bitstreams/6c0532d8-8c77-4f7d-8af5-0eb480840a11/download>
- Tejada, C., Villabona, Á. & Ruiz, V. (2012). Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. *Ingenium*, 6(14), 11-21.
<https://repositorio.usc.edu.co/handle/20.500.12421/720>
- Torres, M., López, D., y Windevoxhel, R. (2018). Evaluación de los procedimientos de remoción de metales pesados en los residuos de la DQO. *Ingeniería UC*, 25(1), 61-68.
<https://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v25n1/art07.pdf>
- Valladares, M., Valerio, C., De la Cruz, P. y Melgoza, R. (2016). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16 (31), 55-73.
<https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Vallejo, M., Juárez, J., Castro, A., y Arroyo, J. (2019). Evaluación de la actividad antiinflamatoria de un gel con extracto de cálices de *Physalis peruviana* “aguaymanto”. *Ciencia e Investigación*, 22 (1), 5-10.
<https://doi.org/10.15381/ci.v22i1.16809>.
- Vera, L., Bermejo, D., Ugana, M., García, N., Flores, M., y Brazales, D. (2018). Modelado en columna de lecho fijo para la bioadsorción de Cd^{2+} y Pb^{2+} con cáscara de cacao. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4), 611-620.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.05>
- Vera, M., Astudillo, S., y Juela, D. (2022). Estudio experimental y simulación dinámica de la adsorción de Cd^{2+} y Pb^{2+} utilizando cáscara de cacao en columna de lecho fijo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(6), 56-97.
<https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2662/2494>

Viades Trejo, J. (2013). *Fisicoquímica de Alimentos*. Universidad Nacional Autónoma de México.

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorption_23226.pdf

Vijay, L., y Rajesh, A. (2021). Application of Waste Egg Shell for Adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions to Protect Environment: Equilibrium, Kinetic and Adsorption Studies. *Oriental Journal of Chemistry*, 37 (1), 128-135.

<https://www.orientjchem.org/vol37no1/application-of-waste-egg-shell-for-adsorption-of-cdii-and-pbii-ions-to-protect-environment-equilibrium-kinetic-and-adsorption-studies/>

Villa, G., Huamaní, C., Chávez, M. y Huamaní, J. (2018) Evaluación de la remoción de arsénico en agua superficial utilizando filtros domiciliarios. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(4), 652-656.

<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.354.3715>

Vizcaíno, L., y Fuentes, N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 43 – 60.

<http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v25n1/v25n1a04.pdf>.

Vizcaíno, L., Fuentes, N. y González, H. (2017). Adsorción de plomo (II) en solución acuosa con tallos y hojas de *Eichhornia crassipes*. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 435-444.

<http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v20n2/v20n2a21.pdf>

ANEXOS Y APENDICES

ANEXO 1.- Fotografías del proceso de elaboración de biofiltros

Figura 16

*Cálices de *Physalis peruviana* L. lavados y secados*



Figura 17

Cáscara de huevo de gallina molida



Figura 18

Tamizaje de cáscara de huevo de gallina



Figura 19

*Tamizaje de cálices de *Physalis peruviana* L.*



Figura 20

Biofiltros a base de cáscara de huevo de gallina y cálices de Physalis peruviana L.



ANEXO 2.- Resultados de análisis de laboratorio de la calidad del efluente



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084

INFORME DE ENSAYO N° IE 06230499

DATOS DEL CLIENTE

Razon Social/Nombre **MAGDA ROSA VELASQUEZ MARIN**
Dirección **Jr. Maria Madalenoitia 104 Cajamarca**
Persona de contacto **MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN** Correo electrónico magdavema@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA

Fecha del Muestreo **28.06.23** Hora de Muestreo **8:00 - 20:00**
Responsable de la toma de muestra **Cliente** Plan de muestreo N° **-**
Procedimiento de Muestreo **-**
Tipo de Muestreo **Puntual**
Número de puntos de muestreo **61**
Ensayos solicitados **Químicos**
Breve descripción del estado de la muestra **Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservacion y conservación**
Referencia de la Muestra: **CAJAMARCA**

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato **SC-467** Cadena de Custodia **CC-499**
Fecha y Hora de Recepción **29.06.23 07:35** Inicio de Ensayo **29.06.23 07:50**
Reporte Resultado **10.06.23 16:40**

Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

Cajamarca, 10 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 06230499

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			CICH	C250-1	C250-1	C250-1	C250-1	C250-1
Código Laboratorio			06230499-01	06230499-02	06230499-03	06230499-04	06230499-05	06230499-06
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	8.550	7.493	8.220	8.390	8.480	8.490
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	8.754	3.595	8.454	8.518	8.635	8.746
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	8.886	1.920	8.052	8.681	8.713	8.839
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	8.408	0.021	0.029	0.665	2.871	4.471

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			C250-2	C250-2	C250-2	C250-2	C250-2	C250-3
Código Laboratorio			06230499-07	06230499-08	06230499-09	06230499-10	06230499-11	06230499-12
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	7.825	8.090	8.130	8.450	8.500	7.716
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	3.665	8.106	8.336	8.478	8.529	3.576
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	1.975	8.189	8.388	8.494	8.640	1.928
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.017	0.037	0.646	2.747	4.473	0.018

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			C250-3	C250-3	C250-3	C250-3	C425-1	C425-1
Código Laboratorio			06230499-13	06230499-14	06230499-15	06230499-16	06230499-17	06230499-18
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	7.879	8.150	8.406	8.430	8.170	8.310
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	8.253	8.396	8.469	8.682	8.185	8.244
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	8.215	8.463	8.563	8.621	7.576	8.143
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.032	0.670	2.835	4.743	0.604	1.197



Cajamarca, 10 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 06230499

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			C425-1	C425-1	C425-1	C425-2	C425-2	C425-2
Código Laboratorio			06230499-19	06230499-20	06230499-21	06230499-22	06230499-23	06230499-24
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	8.350	8.390	8.410	8.170	8.310	8.350
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	8.298	8.367	8.599	8.150	8.409	8.438
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	8.462	8.574	8.605	7.551	8.231	8.412
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	4.577	6.285	7.294	0.596	1.236	4.314

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			C425-2	C425-2	C425-3	C425-3	C425-3	C425-3
Código Laboratorio			06230499-25	06230499-26	06230499-27	06230499-28	06230499-29	06230499-30
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	8.390	8.410	8.240	8.350	8.410	8.440
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	8.453	8.545	8.164	8.378	8.493	8.589
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	8.469	8.560	7.633	8.288	8.465	8.482
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	6.245	6.555	0.600	1.217	4.381	6.259

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			C425-3	H250-1	H250-1	H250-1	H250-1	H250-1
Código Laboratorio			06230499-31	06230499-32	06230499-33	06230499-34	06230499-35	06230499-36
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	8.458	4.485	4.652	4.758	4.772	4.784
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	8.644	0.005	0.011	0.526	2.285	3.539
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	8.589	0.097	0.134	0.551	1.109	1.354
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	6.912	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013



Cajamarca, 10 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 06230499

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			H250-2	H250-2	H250-2	H250-2	H250-2	H250-3
Código Laboratorio			06230499-37	06230499-38	06230499-39	06230499-40	06230499-41	06230499-42
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	4.207	4.304	4.436	4.597	4.731	4.498
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	0.003	0.130	0.301	1.843	2.108	0.006
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	0.097	0.139	0.149	0.517	0.722	0.098
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.007	0.008	0.009	0.010	0.013	0.009

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			H250-3	H250-3	H250-3	H250-3	H425-1	H425-1
Código Laboratorio			06230499-43	06230499-44	06230499-45	06230499-46	06230499-47	06230499-48
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	4.509	4.816	4.860	4.895	4.488	5.051
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	0.009	0.527	2.307	3.582	1.062	2.535
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	0.129	0.550	1.111	1.371	1.244	1.379
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.010	0.011	0.012	0.013	0.009	0.010

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			H425-1	H425-1	H425-1	H425-2	H425-2	H425-2
Código Laboratorio			06230499-49	06230499-50	06230499-51	06230499-52	06230499-53	06230499-54
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	5.420	5.893	5.976	4.336	5.162	5.258
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	3.098	6.116	6.656	1.040	2.553	3.111
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	3.780	3.982	4.226	1.218	1.391	3.884
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.047	0.134	0.240	0.010	0.011	0.035



Cajamarca, 10 de Junio de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 06230499

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			H425-2	H425-2	H425-3	H425-3	H425-3	H425-3
Código Laboratorio			06230499-55	06230499-56	06230499-57	06230499-58	06230499-59	06230499-60
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Localización de la Muestra			Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca	Cajamarca
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	5.506	5.825	4.434	5.049	5.502	5.978
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	6.152	4.004	1.052	2.526	3.147	6.181
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	4.059	4.293	1.229	1.380	3.843	4.038
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.088	0.156	0.010	0.011	0.041	0.118

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			H425-3	-	-	-	-	-
Código Laboratorio			06230499-61	-	-	-	-	-
Matriz			Residual	-	-	-	-	-
Descripción			INDUSTRIAL	-	-	-	-	-
Localización de la Muestra			Cajamarca	-	-	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Arsénico (As)	mg/L	0.0050	6.107	-	-	-	-	-
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0020	6.715	-	-	-	-	-
Cromo (Cr)	mg/L	0.0030	4.243	-	-	-	-	-
Plomo (Pb)	mg/L	0.0040	0.211	-	-	-	-	-

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO ₂ , Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, Zn)	mg/L	EPA Method 200.7 Rev. 4.4, 1994, (Validado) 2020 Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

NOTAS FINALES

- (*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y/o matriz que no han sido acreditados por el INACAL - DA.
- (**) Los Resultados son referenciales, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación estipulado por el método, por lo tanto no se encuentra dentro del alcance de acreditación.
- ✓ Los resultados indicados en este informe concierne única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua. Cuando la toma de muestra lo realiza el cliente los resultados aplican a las muestras como son recibidas.
- ✓ La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.
- ✓ Las muestras sobre los que se realicen los ensayos se conservaran en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de perecibilidad que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.
- ✓ Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL-DA.
- ✓ Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

"Fin del documento"

Código del Formato: P-23-F01 Rev:N°02 Fecha : 03/07/2020



Cajamarca, 10 de Junio de 2023

Anexo 3: Resultados de análisis de laboratorio del espectro FTIR-ATR de las muestras



**SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS
S.A.C.**

INFORME DE ENSAYO IE-2023-2049

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN
1.2 RUC o DNI : 10414000890
1.3 Dirección : No Precisa

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : BIOMASA
2.2 Muestreado por : CLIENTE ^(c)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2023-11-30
2.5 Período de Ensayo : 2023-11-30 al 2023-12-07
2.6 Fecha de Emisión : 2023-12-11
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-134410-SL23

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Caracterización de materiales por Análisis de Espectroscopía Infrarroja FTIR-ATR	ASTM E1252 Práctica estándar para técnicas generales de obtención de espectros infrarrojos para análisis cualitativo

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN

Descripción de Muestra: Cáscara de huevo (Código: HAP) ^(c)


DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (FTIR-ATR)

- Normas de Referencia: ASTM E1252 "Práctica estándar para técnicas generales para obtener espectros infrarrojos para análisis cualitativo".
- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 650 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}

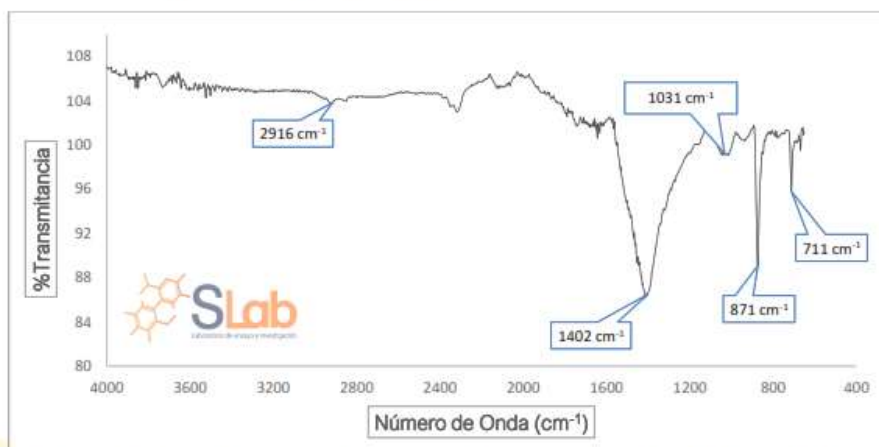


Figura N°1: ESPECTRO FTIR-ATR DE LA MUESTRA

Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES DEL FTIR DE LA MUESTRA

Tipo de Vibración	Grupo funcional	Rango Teórico (cm^{-1})	Resultado experimental (cm^{-1})
Banda de vibración de tensión	"-C-H "	2990-2800	2916
Banda de vibración de tensión	"-CO ₃ ²⁻ "	1480-1320	1402
Banda de vibración de balanceo	"-C-O- "	1200-980	1031
Banda de vibración de balanceo	"-CO ₃ ²⁻ "	880-750	871
Banda de vibración de flexión	"-CaO- "	780-640	711

Comentarios:

- Para el ensayo de caracterización por FTIR de la muestra S-3103, se muestran picos característicos de los enlaces CH, CO₃²⁻, CO y CaO, que son atribuidos a una composición de cascara de huevo.

Leyenda

^(c) Información suministrada por el cliente.

FIN DE DOCUMENTO

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.



**INFORME DE ENSAYO
IE-2023-2051****1. DATOS DEL CLIENTE**

1.1 Cliente : MAGDA ROSA VELÁSQUEZ MARIN
1.2 RUC o DNI : 10414000890
1.3 Dirección : No precisa

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : BIOMASA
2.2 Muestreado por : CLIENTE ^(*)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2023-11-30
2.5 Período de Ensayo : 2023-11-30 al 2023-12-07
2.6 Fecha de Emisión : 2023-12-11
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-134410-SL23

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	METODO
Caracterización de materiales por Análisis de Espectroscopia Infrarroja FTIR-ATR	ASTM E1252 Práctica estándar para técnicas generales de obtención de espectros infrarrojos para análisis cualitativo

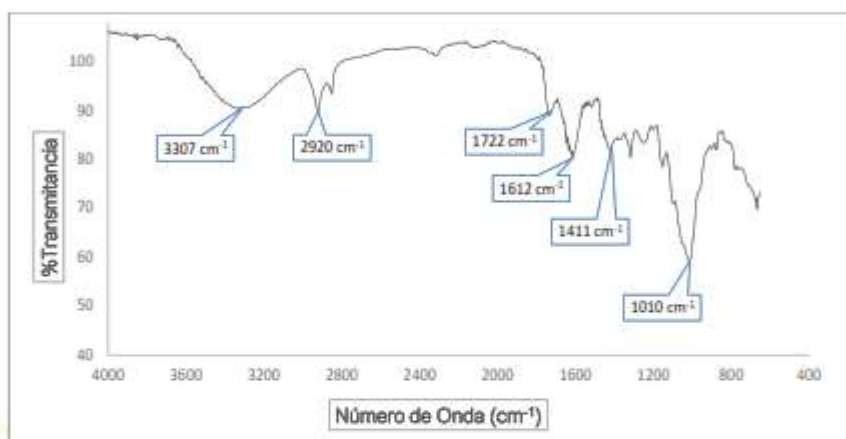
4. RESULTADOS**4.1. DESCRIPCIÓN**

Descripción de Muestra: Cálices de aguaymanto (Código: AAP) ^(*)


DIEGO ROMÁN VERGARA D'AMICO
QUÍMICO
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (FTIR-ATR)

- Normas de Referencia: ASTM E1252 "Práctica estándar para técnicas generales para obtener espectros infrarrojos para análisis cualitativo".
- Equipo Utilizado: Espectrofotómetro Infrarrojo -Perkin Elmer
- Software: Perkin Elmer Spectrum 10
- Rango de Prueba: Intervalo de número de onda 650 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}


Figura N°1: ESPECTRO FTIR-ATR DE LA MUESTRA
Tabla N°1: IDENTIFICACIÓN DE LOS GRUPOS FUNCIONALES DEL FTIR DE LA MUESTRA

Tipo de Vibración	Grupo funcional	Rango Teórico (cm^{-1})	Resultado experimental (cm^{-1})
Banda de vibración de tensión	"O-H "	3400-3200	3307
Banda de vibración de tensión	"C-H "	2990-2820	2920
Banda de vibración de tensión	"C=O "	1780-1620	1722
Banda de vibración de balanceo	"-O-H "	1670-1570	1612
Banda de vibración de tensión	"-CO ₂ - "	1480-1320	1411
Banda de vibración de balanceo	"C-O-"	1200-980	1010

Comentarios:

- Para el ensayo de caracterización por FTIR de la muestra S-3105, se muestran picos característicos de los enlaces CH, OH, CO₃²⁻ y CO, que son atribuidos para un compuesto que están formados a base de estos elementos, como es el caso de calices (en aguaymanto).

Leyenda

¹⁹⁴ Información suministrada por el cliente.

FIN DE DOCUMENTO

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

