



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Remoción de plomo mediante bioadsorbente obtenido de la cáscara de naranja, nivel laboratorio

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

Autora

Seili Yesenia Espinoza Carrillo

Asesor

Dr. Víctor Raúl Coca Ramírez

VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ
INGENIERO QUÍMICO
Reg. del Colegio de Ingenieros N° 48944

Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL
JOSE FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN
LICENCIADA

(Resolución De Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD/De fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Seili Yesenia Espinoza Carrillo	76295717	23/04/2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Dr. Víctor Raúl Coca Ramírez	15601160	https://orcid.org/0000-0002-2287-7060
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Dr. Máximo Tomas Salcedo Meza	15602588	https://orcid.org/0000-0003-1993-2513
Dr. Alberto Irhaam Sanchez Guzman	15758117	https://orcid.org/0000-0003-1575-8466
Ing. Edelmira Torres Corcino	15649132	https://orcid.org/0009-0009-7903-4652

Espinoza Carrillo Seili Yesenia 2025-094262

Remoción de plomo mediante bioadsorbente obtenido de la cáscara de naranja, nivel laboratorio

 Quick Submit

 Quick Submit

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3418799467

Fecha de entrega

20 nov 2025, 12:08 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

20 nov 2025, 12:33 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_SEILI_ESPINOZA.docx

Tamaño del archivo

3.5 MB

91 páginas

16.976 palabras

95.477 caracteres



Página 2 de 98 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3418799467

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Este logro es dedicado con mucho amor para todos ustedes, quienes fueron piezas fundamentales en cada etapa de mi vida, que de una y otra manera contribuyeron mucho para este logro de titulación.

Dedicado primeramente a Dios, por guiar cada paso en mi vida, por brindarme sabiduría y por darme la fuerza necesaria.

A mis queridos padres Edila y Wilson, por amarme y brindarme su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.

A mi esposo Diego, por estar a mi lado en cada momento, por su paciencia, comprensión y aliento constante durante todo este proceso.

A mi querido hijo Héctor, por ser la motivación de mi superación diaria como persona y como profesional.

A mis hermanos, Jesica, Josein y Jhaziel por su apoyo constante y ser mis mejores aliados.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la fuerza y ser el quien guía mi camino día tras día.

A mis queridos padres Edila y Wilson por su apoyo incondicional y por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria.

Gracias por estar a mi lado en las buenas y en las malas, por enseñarme a no rendirme y a luchar por mis metas hasta lograrlo.

Índice de contenido

Dedicatoria.....	5
Índice de contenido.....	7
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras.....	14
Índice de Ecuaciones	15
Índice de Anexos	16
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Introducción	19
Capítulo I. Planteamiento del Problema	20
1.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	20
1.2. Formulación del Problema.....	21
1.2.1. Problema General	21
1.2.2. Problemas Específicos.....	21
1.3. Objetivos de la Investigación	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4. Justificación de la Investigación.....	22
1.4.1. Justificación Teórica.....	22
1.4.2. Justificación Práctica	22
1.4.3. Justificación Metodológica.....	22
1.4.4. Justificación de Relevancia Social	23

1.5.	Delimitaciones del Estudio	23
1.6.	Viabilidad del Estudio	24
	Capítulo II. Marco Teórico	25
2.1.	Antecedentes de la Investigación	25
2.1.1.	Investigaciones Internacionales	25
2.1.2.	Investigaciones Nacionales	26
2.2.	Bases Teóricas	27
2.2.1.	Adsorción	29
2.2.2.	Bioadsorción.....	31
2.2.3.	Metales Pesados.....	33
2.2.4.	Impacto Ambiental de la Contaminación por Plomo	33
2.2.5.	Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM	35
2.2.6.	Importancia Agronómica y Morfología de los Cítricos.....	35
2.2.7.	Clasificación Taxonómica de Citrus Sinensis	36
2.2.8.	Características Generales y Aprovechamiento Agroindustrial de la Naranja Valencia.....	37
2.2.9.	Morfología del Fruto de la Naranja: Flavedo, Albedo y Pulpa	37
2.2.10.	Composición Física de la Naranja y Humedad del Albedo.....	38
2.2.11.	Condiciones Agroclimáticas para el Cultivo y Distribución Global de la Naranja	39
2.2.12.	Propiedades Físicoquímicas de la Cáscara de Naranja y su Potencial Adsorbente.....	40

2.2.13.	Aplicaciones Tecnológicas y Agroindustriales de la Cáscara de Naranja ..	41
2.2.14.	Material Bioadsorbente de Cáscara de Naranja: Estructura, Composición y Potencial de Adsorción.....	42
2.2.15.	Métodos de Activación para la Obtención de Bioadsorbentes	44
2.2.16.	Características Químicas del Bioadsorbente Obtenido a Partir de Cáscara de Naranja para la Remoción de Plomo	46
2.2.17.	Clasificación de Bioadsorbentes a Base de Carbón Activado Utilizados en la Remoción de Plomo	47
2.2.18.	Aplicaciones de Bioadsorbentes en el Tratamiento de Aguas Contaminadas con Plomo	48
2.3.	Definiciones Conceptuales	50
2.4.	Formulación de Hipótesis	52
2.4.1.	Hipótesis general	52
2.4.2.	Hipótesis específicas	52
2.4.3.	Hipótesis Nula	52
2.5.	Operacionalización de Variables.....	52
2.6.	Matriz de Consistencia	54
	Capítulo III. Metodología	55
3.1.	Diseño Metodológico	55
3.1.1.	Enfoque.....	55
3.1.2.	Tipo de Investigación	55
3.1.3.	Nivel de Investigación	55

3.2.	Población y Muestra	56
3.2.1.	Población	56
3.2.2.	Muestra	56
3.3.	Recursos Empleados en la Etapa Experimental	56
3.3.1.	Materiales y Reactivos para la Producción y Activación del Bioadsorbente ..	56
3.3.2.	Materiales para Preparar las Soluciones Contaminadas	57
3.3.3.	Materiales y Recursos para el Proceso de Adsorción.....	57
3.3.4.	Materiales y Recursos para la Medición de la Remoción de Plomo	57
3.4.	Procedimiento Experimental	58
3.4.1.	Selección y recolección del residuo vegetal	58
3.4.2.	Limpieza para eliminación de impurezas	58
3.4.3.	Secado controlado del material	59
3.4.4.	Trituración primaria y tamizado	59
3.4.5.	Activación química del precursor.....	59
3.4.6.	Lavado para neutralización del exceso de reactivo	59
3.4.7.	Secado posterior al lavado.....	60
3.4.8.	Calcinación o tratamiento térmico en mufla	60
3.4.9.	Molienda final y ajuste granulométrico.....	60
3.4.10.	Almacenamiento del producto terminado.....	60
3.5.	Técnicas de Recolección de Datos	60
3.5.1.	Observación en el laboratorio.....	61
3.5.2.	Registro de datos numéricos.....	61

3.5.3.	Titulación para medir el plomo	61
3.5.4.	Comparación de resultados.....	62
3.6.	Técnicas para el Procesamiento de la Información	63
3.7.	Diseño experimental.....	63
Capítulo IV. Análisis de Resultados		66
4.1.	Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja).....	66
4.1.1.	Acidez Volátil.....	66
4.1.2.	Porcentaje de Cenizas	66
4.1.3.	Porcentaje de Humedad	66
4.2.	Determinación del Porcentaje de Remoción Plomo	67
Capítulo V. Discusión de Resultados		72
5.1.	Discusión de la Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja)	72
5.1.1.	Discusión de la Acidez Volátil	72
5.1.2.	Discusión del Porcentaje de Cenizas	72
5.1.3.	Discusión del Porcentaje de Humedad	73
5.2.	Discusión de Resultados del Diseño Experimental: Factorial 2x2 con 3 Réplicas....	73
5.2.1.	Discusión de la Síntesis del Diseño experimental.	73
5.2.2.	Discusión del Análisis de Varianza (ANOVA) del Diseño Experimental	74
5.2.3.	Discusión de la Ecuación de Regresión y el Gráfico de Superficies.....	74
5.2.4.	Discusión del Gráfico de Efectos Estandarizados y Residuos	75
Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones.....		76
6.1.	Conclusiones.....	76

6.2.	Recomendaciones	77
	Referencias.....	78
	Anexos	83

Índice de Tablas

Tabla 1 Modelo de Isotermas de Adsorción por Foo y Hameed.	30
Tabla 2. Composición de la Naranja	38
Tabla 3 Composición Fisicoquímica Aproximada de la Cáscara de Naranja (Citrus sinensis L. Osbeck).....	40
Tabla 4 Aplicaciones Tecnológicas y Agroindustriales de la Cáscara de Naranja.....	41
Tabla 5 Clasificación de poros en materiales adsorbentes según su tamaño.....	43
Tabla 6 Principales Parámetros con los que se Especifica un Bioadsorbente Tipo Carbón Activado para el Tratamiento de Agua Contaminada con Plomo.	47
Tabla 7. Operacionalización de la Variable.....	52
Tabla 8. Matriz de Consistencia	54
Tabla 9 Factores Independientes	63
Tabla 10 Resumen del Diseño Factorial 2x2.....	64
Tabla 11 Tabla Aleatorizada de Diseño Codificada.....	64
Tabla 12 Matriz de Diseño Experimental (Factorial 2x2 con tres réplicas).....	65
Tabla 13 Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja	66
Tabla 14 Porcentaje de Cenizas de la Cáscara de Naranja	66
Tabla 15 Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja	66
Tabla 16 Titulación de las Muestras Contaminadas de Plomos Tratadas con el Bioadsorbente de Cáscara de Naranja.	67
Tabla 17 Porcentaje de Remoción de Plomo de las Muestras Contaminadas a Través del bioadsorbente de Cáscara de Naranja.....	68
Tabla 18 Síntesis del Modelo Factorial 2X2 con 3 réplicas construido en Minitab.....	68
Tabla 19 Análisis de Varianza del Modelo Factorial 2X2 con 3 réplicas	69

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema del Proceso de Adsorción.	29
Figura 2 Morfología de la Naranja.	38
Figura 3 Flujograma General para la Producción de Bioadsorbente a Partir de la Cáscara de Naranja.....	45
Figura 4 Diagrama de Efectos Estándar (Pareto) para los Efectos Estandarizados del Diseño Experimental.	69
Figura 5 Gráficas de residuos para el Modelo de Regresión del Diseño Experimental.	70
Figura 6 Grafica de Superficies para el Diseño Experimental	71

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Porcentaje de Remoción de Plomo de las Muestras Tratadas	62
Ecuación 2 Ecuación de Regresión del Diseño Experimental.....	69

Índice de Anexos

Anexo 1 Proceso de Secado para la Materia Prima.....	83
Anexo 2 Proceso de Trituración y Tamizado.....	83
Anexo 3 Calcinación de la Cáscara de Naranja en Polvo.	84
Anexo 4 Activación Química del Bioadsorbente	85
Anexo 5 Lavado, Filtrado y Secado del Bioadsorbente.	86
Anexo 6 Preparación de la Solución Estándar de Plomo.	87
Anexo 7 Preparación de la Solución EDTA.....	87
Anexo 8 Preparación del Indicador Xilenol Naranja.	88
Anexo 9 Preparación del Sistema Tampón Ácido Acético-Acetato de Sodio.	89
Anexo 10 Preparación de las Muestras.	90
Anexo 11 Titulación de las Muestras.	91

Resumen

Este trabajo parte de una preocupación sencilla y tangible: ¿qué podemos hacer con las cáscaras de naranja que se desechan a diario y que, al mismo tiempo, nos permita adelantarnos a un problema grave como la contaminación por plomo? Para responderlo, se desarrolló y evaluó en laboratorio un bioadsorbente a partir de cáscara de naranja calcinada, siguiendo un diseño factorial 2×2 (temperaturas $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\times$ masas 0.5 g y 1.0 g) con tres réplicas por tratamiento (12 corridas). La materia prima mostró valores compatibles con su uso como precursor (acidez volátil $\approx 0.41\text{ g ácido acético}/100\text{ g}$; humedad $\approx 13.93\%$; cenizas $\approx 7.73\%$). Las pruebas de remoción de Pb^{2+} , medidas por titulación complexométrica con EDTA, revelaron que la masa del adsorbente y la temperatura de calcinación influyen significativamente en el desempeño; el modelo experimental explicó el 89.30% de la variabilidad (R^2), con R^2 ajustado 85.29% y R^2 predicho 75.93% . La ecuación empírica resultante ($\%R = 111.2 + 20.4 \cdot m - 0.1900 \cdot T + 0.009 \cdot m \cdot T$) sugiere que aumentar la masa mejora la remoción, mientras que temperaturas demasiado elevadas pueden reducir la eficacia. En conjunto, los hallazgos indican que la cáscara de naranja es un precursor viable, económico y sostenible para producir un bioadsorbente efectivo en condiciones de laboratorio; se recomienda optimizar el secado y la temperatura de calcinación, evaluar regeneración y extender ensayos a aguas reales y pruebas piloto.

Palabras Clave: bioadsorbente; cáscara de naranja; plomo (Pb^{2+}); calcinación; diseño factorial; remoción de metales.

Abstract

This work starts from a simple, tangible question: what can we do with the orange peels discarded every day that also helps us anticipate a serious problem like lead contamination? To answer this, an activated bioadsorbent was developed and evaluated in the laboratory from calcined orange peel, using a 2×2 factorial design (temperatures 400 °C and 500 °C × masses 0.5 g and 1.0 g) with three replicates per treatment (12 runs). The raw material showed values compatible with its use as a precursor (volatile acidity $\approx$ 0.41 g acetic acid/100 g; moisture $\approx$ 13.93%; ash $\approx$ 7.73%). Pb²⁺ removal tests, measured by complexometric titration with EDTA, revealed that adsorbent mass and calcination temperature significantly influence performance; the experimental model explained 89.30% of the variability (R^2), with adjusted $R^2 = 85.29\%$ and predicted $R^2 = 75.93\%$. The resulting empirical equation ($\%R = 111.2 + 20.4 \cdot m - 0.1900 \cdot T + 0.009 \cdot m \cdot T$) suggests that increasing the mass improves removal, while excessively high temperatures may reduce efficacy. Overall, the findings indicate that orange peel is a viable, economical, and sustainable precursor for producing an effective bioadsorbent under laboratory conditions; it is recommended to optimize drying and calcination temperature, evaluate adsorbent regeneration, and extend tests to real waters and pilot trials.

Keywords: bioadsorbent; orange peel; lead (Pb²⁺); calcination; factorial design; metal removal.

Introducción

La amenaza que representan los metales pesados en el agua —y el plomo en particular— no es solo un asunto técnico: es una preocupación por la salud de las personas y el futuro de las comunidades. Ante la posibilidad de que este problema alcance zonas que hoy aún no lo padecen, surge la necesidad de soluciones preventivas, sencillas y accesibles. En ese marco, transformar residuos cotidianos en recursos útiles es una apuesta doblemente valiosa: por un lado, reduce desechos; por otro, genera materiales que pueden ayudar a limpiar el agua. Esta investigación se centra en esa idea práctica: explorar si la cáscara de naranja, tras un tratamiento controlado (activación química y calcinación), puede convertirse en un bioadsorbente capaz de capturar iones de plomo en solución. Más allá de demostrar su eficacia en el laboratorio, se busca entender cómo variables concretas —masa del adsorbente, temperatura de calcinación, pH y tiempos de contacto— influyen en su desempeño, de modo que los resultados sirvan para diseñar protocolos replicables y pensar en escalados reales. Así, la tesis no solo aporta datos y modelos; propone una alternativa local, económica y coherente con la economía circular para anticipar y mitigar riesgos ambientales.

Capítulo I. Planteamiento del Problema

1.1.Descripción de la Realidad Problemática

En distintas partes del mundo, uno de los problemas más preocupantes es la contaminación causada por metales pesados, como el plomo. Este tipo de sustancia puede encontrarse en el agua cuando hay actividades industriales, mineras o por desechos mal manejados. Lo grave es que el plomo no solo contamina el ambiente, sino que también puede afectar a las personas y animales si entra en sus cuerpos, especialmente a través del agua o los alimentos.

En lugares como Huacho, una ciudad de la región Lima, todavía no se han detectado altos niveles de plomo en el agua. Sin embargo, eso no quiere decir que no pueda pasar más adelante, por lo que es importante pensar en soluciones antes de que el problema aparezca. Además, Huacho genera bastantes residuos orgánicos todos los días, como las cáscaras de naranja, sobre todo por el consumo de frutas en casas y mercados.

Una idea interesante sería darles un nuevo uso a esas cáscaras, que normalmente se botan, y convertirlas en un material que ayude a limpiar el agua, atrapando metales como el plomo. A este tipo de materiales se les llama bioadsorbentes. Son una alternativa más económica y natural en comparación con los métodos químicos tradicionales, que pueden ser más costosos y difíciles de aplicar, sobre todo en zonas con pocos recursos.

Por eso, investigar esta opción no solo puede servir para proteger la salud y el medio ambiente, sino también para reducir la cantidad de residuos que se generan en la ciudad. En resumen, se trata de aprovechar lo que normalmente se considera basura para dar una solución a un problema potencial que podría afectar a la población en el futuro.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo influye la temperatura de calcinación y la masa del bioadsorbente obtenido de cáscara de naranja en la eficiencia de remoción de plomo en soluciones acuosas?

1.2.2. Problemas Específicos

¿Qué procedimiento permite elaborar el bioadsorbente a partir de cáscara de naranja?

¿Qué cambios se observan en la concentración de plomo antes y después del tratamiento?

¿Cuáles son los parámetros óptimos de operación para la remoción de plomo con este bioadsorbente?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia del bioadsorbente obtenido a partir de cáscara de naranja calcinada para la remoción de iones de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas, bajo condiciones controladas de laboratorio.

1.3.2. Objetivos específicos

Diseñar un procedimiento experimental para la obtención de bioadsorbente a partir de cáscara de naranja calcinada, a nivel de laboratorio.

Determinar la concentración de plomo en las soluciones acuosas antes y después del tratamiento con el bioadsorbente, mediante técnicas analíticas apropiadas.

Identificar los parámetros operativos óptimos (temperatura de calcinación y masa del bioadsorbente) que maximicen la eficiencia de remoción de plomo en soluciones acuosas.

1.4. Justificación de la Investigación

1.4.1. Justificación Teórica

La contaminación por metales pesados, como el plomo, constituye un problema ambiental hurdenomico que tiene efectos negativos en la salud humana y el reino de la naturaleza. La adsorción teórica presenta lo conceptual cuanto posible a la vez para aprender a qué medida el bioadsorbente puede absorber a los contaminantes. Además, el uso de cáscaras de naranja como bioadsorbente se fundamenta en sus particularidades físicas y químicas a través de la cual se relacionan con iones metálicos.

1.4.2. Justificación Práctica

Desde una perspectiva práctica, esta investigación responde a la necesidad apremiante de encontrar soluciones sostenibles y accesibles para eliminar el plomo del agua contaminada. Los métodos tradicionales, como la filtración o la precipitación química, suelen implicar altos costos y generar subproductos contaminantes. En cambio, aprovechar cáscaras de naranja—un residuo agroindustrial ampliamente disponible—ofrece una opción económica y ecológica. Además, este método resulta especialmente útil para comunidades con recursos limitados, ya que no requiere tecnologías complejas y puede aplicarse con facilidad a nivel local.

1.4.3. Justificación Metodológica

La metodología propuesta se fundamenta en un diseño experimental riguroso que permitirá evaluar la capacidad de adsorción del bioadsorbente a base de cáscara de naranja bajo diferentes condiciones controladas. Se analizará el efecto de variables clave como el

pH de la solución, la masa del bioadsorbente utilizada y la temperatura de calcinación aplicada durante el tratamiento del material. Estos factores son determinantes en la eficiencia del proceso de adsorción y permitirán optimizar el desempeño del bioadsorbente.

Para medir la eficacia de remoción del plomo, se emplearán **técnicas volumétricas**, que ofrecerán resultados cuantitativos fiables sobre la concentración de metal antes y después del tratamiento. Este enfoque metodológico no solo proporciona una base sólida para evaluar el uso específico de la cáscara de naranja como bioadsorbente, sino que también puede ser replicado en estudios similares que busquen aprovechar otros residuos agroindustriales para la remediación de aguas contaminadas.

1.4.4. Justificación de Relevancia Social

Esta investigación tiene una alta relevancia social debido a las graves consecuencias que la contaminación por plomo puede tener sobre la salud pública. La exposición a este metal está vinculada a trastornos neurológicos, enfermedades cardiovasculares y otros efectos perjudiciales, especialmente en niños y poblaciones más vulnerables. Desarrollar una alternativa sostenible y de bajo costo para eliminar el plomo del agua podría representar un avance significativo en la mejora del acceso a agua potable segura en comunidades en riesgo. Además, al aprovechar residuos agroindustriales y recursos naturales disponibles localmente, se impulsa un modelo de economía circular que no solo contribuye a la protección del medio ambiente, sino que también fortalece el bienestar y la autosuficiencia de las comunidades locales.

1.5. Delimitaciones del Estudio

Este estudio se centrará en evaluar, en condiciones de laboratorio, la capacidad de cáscaras de naranja calcinadas para remover iones de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas sintéticas. Se analizarán los efectos del pH, la masa del bioadsorbente y la temperatura de

calcinación sobre la eficiencia de adsorción. El bioadsorbente se obtendrá exclusivamente de cáscaras recolectadas en Huacho (Lima, Perú), y la remoción del plomo será determinada mediante técnicas volumétricas. La investigación no incluirá otros metales ni pruebas en aguas reales, enfocándose únicamente en validar esta alternativa sostenible a pequeña escala.

1.6. Viabilidad del Estudio

La viabilidad de esta investigación es sólida tanto en el aspecto técnico como en el logístico. El estudio se desarrollará en condiciones de laboratorio controladas, utilizando materiales de bajo costo y fácilmente accesibles como cáscaras de naranja, lo que reduce significativamente los requerimientos presupuestarios. El tesista cuenta con los recursos económicos necesarios para cubrir los gastos de laboratorio, materiales y análisis. Además, contará con el acompañamiento de asesores especializados lo que garantiza un adecuado soporte académico. A ello se suma la disponibilidad de tiempo y acceso a fuentes confiables de información científica, lo que permite asegurar el desarrollo integral y oportuno del proyecto.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Investigación

En los últimos años, múltiples estudios a nivel nacional e internacional han investigado el uso de materiales naturales para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, destacando el aprovechamiento de residuos agroindustriales como las cáscaras de naranja. Estas investigaciones han demostrado que es posible desarrollar soluciones accesibles y sostenibles mediante el uso de bioadsorbentes que, además de ser económicos, son amigables con el medio ambiente. El presente trabajo se apoya en estos antecedentes, los cuales demuestran la efectividad y viabilidad de esta estrategia en diferentes contextos sociales y ambientales. A continuación, se presentan algunos estudios clave que sustentan esta propuesta investigativa.

2.1.1. Investigaciones Internacionales

Boulaajaj et al. (2022) realizaron un estudio experimental en el que se utilizó cáscara de naranja seca y calcinada para remover iones de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas. Se evaluaron parámetros como el pH, el tiempo de contacto y la dosis del bioadsorbente, encontrando que bajo un pH óptimo de 5 y con una dosis de 1 g/L, la eficiencia de remoción superó el 90%. Además, se aplicaron modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich, donde se evidenció una capacidad máxima de adsorción de aproximadamente 43 mg/g. Este trabajo no solo validó el uso del residuo cítrico como adsorbente efectivo, sino que también proporcionó bases estadísticas y termodinámicas sólidas para futuras aplicaciones prácticas.

En el estudio de Aguayo-Villarreal et al. (2018), se modificaron químicamente cáscaras de naranja utilizando ácido cítrico para potenciar su capacidad de adsorción de metales pesados. Se trabajó específicamente con soluciones sintéticas contaminadas con

plomo y cadmio, y los resultados mostraron una mejora del 30 al 50% en la eficiencia de remoción en comparación con cáscaras sin modificar. El análisis reveló que la incorporación de grupos carboxilos adicionales en la superficie del bioadsorbente permitió una mayor interacción con los iones metálicos. Este antecedente destaca la importancia de las modificaciones superficiales en la mejora del rendimiento de materiales naturales para el tratamiento de aguas contaminadas.

El-Naggar et al. (2021) desarrollaron una revisión científica en la que analizaron diversos residuos agrícolas utilizados como biosorbentes en el tratamiento de aguas contaminadas, entre ellos la cáscara de naranja. El estudio destacó que este residuo posee una estructura porosa rica en lignina, hemicelulosa y pectina, compuestos que contienen grupos funcionales activos como hidroxilos y carboxilos, esenciales para la adsorción de metales como el plomo. También se señaló que la disponibilidad global de este residuo y su bajo costo lo convierten en una opción viable para aplicaciones a gran escala, especialmente en contextos rurales o en países en desarrollo. La revisión concluyó que su uso se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular, promoviendo soluciones accesibles para el tratamiento de agua.

2.1.2. Investigaciones Nacionales

Rodríguez Núñez (2021), en su tesis desarrollada en la Universidad Nacional Federico Villarreal, investigó el uso de cáscara de naranja seca como bioadsorbente para la remoción de plomo en soluciones sintéticas. En sus experimentos se variaron parámetros como el pH, el tiempo de contacto y la concentración de plomo, encontrando que el mejor rendimiento se lograba a un pH de 5, con un tiempo de contacto de 60 minutos y una eficiencia de remoción del 82%. El estudio también destacó la simplicidad del proceso de preparación del bioadsorbente y su bajo costo, lo que lo hace viable para su implementación en contextos locales con recursos limitados.

Huamán Quispe (2020), en una investigación realizada en la Universidad Nacional de Ingeniería, evaluó diversos residuos agroindustriales como posibles adsorbentes de metales pesados en aguas residuales procedentes de actividades mineras. Dentro de los materiales analizados, la cáscara de naranja mostró una de las mayores capacidades de retención de plomo, con niveles de remoción cercanos al 80% bajo condiciones de laboratorio controladas. Además, se subrayó la importancia de su disponibilidad en el mercado local y su impacto positivo en la gestión de residuos sólidos orgánicos. El estudio concluye que este tipo de soluciones pueden adaptarse fácilmente a zonas afectadas por la minería en la sierra central del Perú.

Ramírez Cárdenas (2023), desde la Universidad Nacional del Centro del Perú, desarrolló un prototipo de biofiltro utilizando cáscaras de naranja trituradas para tratar aguas contaminadas con plomo en comunidades rurales de la región Junín. El sistema diseñado fue de tipo percolador, y logró una eficiencia de remoción del 75% en condiciones reales. Se evaluaron también factores como el tamaño de partícula del adsorbente, la velocidad de flujo del agua y el tiempo de residencia. La investigación demostró que es posible escalar esta tecnología a nivel comunitario, y propuso su aplicación como solución alternativa en zonas con acceso limitado a plantas de tratamiento convencionales.

2.2.Bases Teóricas

La presencia de metales pesados como el plomo (Pb^{2+}) en el agua constituye un serio problema ambiental debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. Este metal no se descompone de forma natural y puede generar daños considerables en los seres humanos, afectando el sistema nervioso, el aparato circulatorio y el desarrollo infantil, especialmente en zonas con alta exposición (Alloway, 2013). Frente a esta problemática, se hace urgente el desarrollo de métodos alternativos que sean eficaces,

sostenibles y económicamente viables para remover este contaminante, en especial en regiones con acceso limitado a tecnología avanzada.

Una alternativa con alto potencial es la utilización de bioadsorbentes, materiales de origen vegetal o biológico que pueden captar sustancias contaminantes a través del proceso de adsorción, el cual consiste en la fijación de partículas en la superficie del adsorbente. Este fenómeno es explicado mediante modelos como los de Langmuir y Freundlich, que permiten entender la dinámica del sistema en función de variables como la concentración, la cantidad de adsorbente y las características fisicoquímicas de la solución (Foo & Hameed, 2010). Dentro de las condiciones que influyen en la eficacia del proceso se encuentran el pH, el tiempo de contacto, la cantidad de material adsorbente y la temperatura de tratamiento del mismo.

Entre los residuos orgánicos más estudiados destaca la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*), ya que contiene compuestos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina, todos ellos con grupos funcionales capaces de establecer enlaces con iones metálicos. Se ha observado que, al someter este material a procesos como el secado y la calcinación, su estructura interna se modifica, lo que mejora su capacidad para retener metales pesados como el plomo (El-Naggar et al., 2021). Diversas investigaciones han reportado eficiencias de remoción superiores al 80% en condiciones óptimas de laboratorio, lo que respalda su uso como opción accesible y ecológica (Boulaajaj et al., 2022; Rodríguez Núñez, 2021).

Además de su efectividad, la cáscara de naranja es un residuo abundante, de bajo costo y fácil obtención, lo cual fortalece su potencial dentro de esquemas de aprovechamiento sostenible y economía circular. En el Perú, estudios como los de Huamán Quispe (2020) y Ramírez Cárdenas (2023) han demostrado que este tipo de materiales pueden ser aplicados con éxito en contextos locales, especialmente en comunidades rurales afectadas por la minería o la falta de acceso a agua potable segura.

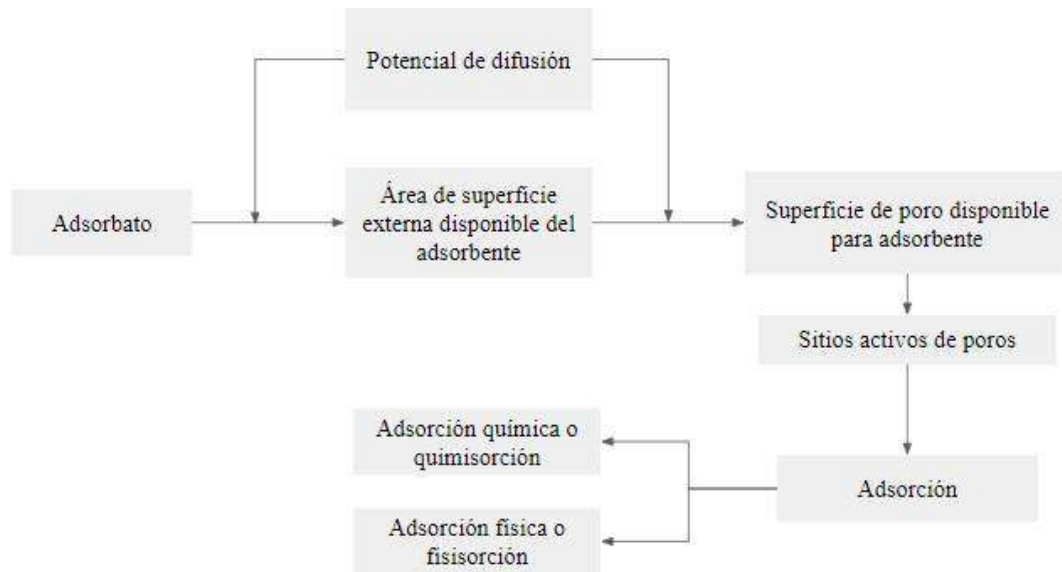
Con base en estos fundamentos, la presente investigación busca evaluar la eficiencia de un bioadsorbente elaborado a partir de cáscara de naranja calcinada, bajo condiciones simuladas de laboratorio. Se analizarán variables como el pH, la masa del adsorbente y la temperatura de calcinación, aplicando soluciones sintéticas contaminadas con plomo y utilizando métodos volumétricos para medir su capacidad de remoción. El objetivo es generar datos que respalden el uso de esta alternativa natural como una solución viable para problemas reales de calidad del agua.

2.2.1. Adsorción

La adsorción es un mecanismo mediante el cual ciertos compuestos presentes en una solución, como los iones de plomo, se fijan sobre la superficie de un material sólido llamado adsorbente. Este proceso no implica que el contaminante penetre el interior del material, sino que se concentra en su superficie externa o en sus poros accesibles. La retención se produce a través de interacciones como atracción electrostática, enlaces químicos superficiales o fuerzas físicas de baja intensidad. Según Foo y Hameed (2010), la eficiencia de la adsorción está condicionada por factores como el tipo de adsorbente utilizado, la acidez o alcalinidad del medio, el tiempo de exposición y la temperatura. En el caso de los bioadsorbentes naturales, como la cáscara de naranja, los grupos funcionales presentes en su estructura, como los carboxilos y los hidroxilos, permiten establecer enlaces con los iones metálicos, facilitando su captura desde el agua contaminada.

Figura 1

Esquema del Proceso de Adsorción.



Isotermas de Adsorción. Los modelos de isotermas de adsorción se utilizan para explicar cómo se distribuyen los contaminantes entre el líquido y la superficie del material adsorbente cuando se alcanza el equilibrio. Según el análisis realizado por Foo y Hameed (2010), el modelo de Langmuir plantea que la adsorción ocurre en una monocapa sobre una superficie uniforme, con sitios activos limitados y sin interacción entre las moléculas adsorbidas. En cambio, el modelo de Freundlich es de carácter empírico y se ajusta mejor a superficies heterogéneas, ya que no establece un límite máximo de adsorción. Otros modelos, como los de Temkin y Dubinin–Radushkevich, incorporan aspectos energéticos y ayudan a distinguir el tipo de adsorción que ocurre, ya sea física o química, facilitando así la elección del modelo más adecuado de acuerdo con el comportamiento del sistema.

Tabla 1

Modelo de Isotermas de Adsorción por Foo y Hameed.

Modelo	Ecuación General	Características	Supuestos Principales
Langmuir	$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	Supone adsorción en una monocapa homogénea sobre una superficie finita.	Todos los sitios de adsorción son equivalentes; sin interacción entre moléculas adsorbidas.

Modelo	Ecuación General	Características	Supuestos Principales
Freundlich	$q_e = K_F \ln(A) C_e^{1/n}$	Modelo empírico para superficies heterogéneas.	No se alcanza una capacidad máxima; aplicable a bajas concentraciones.
Temkin	$q_e = B \ln(AC_e)$	Considera los efectos indirectos entre adsorbato y adsorbente.	Calor de adsorción disminuye linealmente con la cobertura.
Dubinin–Radushkevich (D–R)	$q_e = q_s \exp(-B\varepsilon^2)$	Determina la naturaleza física o química de la adsorción.	Útil para distinguir entre adsorción física (<20 kJ/mol) o química (>20 kJ/mol).

Fuente: Adaptado de Foo y Hamed (2010).

Las isotermas de adsorción son modelos que explican cómo se distribuyen los contaminantes en equilibrio entre la solución y la superficie del material adsorbente. El modelo de Langmuir describe una adsorción en una sola capa sobre una superficie uniforme, con sitios activos iguales y capacidad limitada de retención. En cambio, el modelo de Freundlich, de tipo empírico, se adapta a superficies irregulares y no establece un máximo de adsorción, por lo que es útil cuando la capacidad varía según la concentración. Por su parte, el modelo de Temkin introduce la idea de que el calor liberado durante la adsorción disminuye a medida que aumenta la cantidad de contaminante retenido, reflejando interacciones progresivas. Finalmente, el modelo Dubinin–Radushkevich aporta una herramienta para identificar si la adsorción es de tipo físico o químico, a partir de la energía media involucrada en el proceso. La elección del modelo más adecuado dependerá de las propiedades del adsorbente utilizado y de las condiciones experimentales evaluadas.

2.2.2. Bioadsorción

La bioadsorción es una alternativa eficaz y sostenible para eliminar metales pesados presentes en aguas contaminadas, utilizando materiales de origen biológico. Volesky (2007) señala que ciertos residuos naturales, como los de origen vegetal o microbiano, tienen la capacidad de fijar iones metálicos a través de procesos fisicoquímicos, sin requerir que el material esté vivo. Esta técnica ha cobrado relevancia por su bajo costo, su versatilidad y su aplicabilidad en escenarios donde las tecnologías

tradicionales de tratamiento de aguas no son viables. En ese sentido, el uso de cáscara de naranja como bioadsorbente representa una opción práctica y ecológica para abordar la contaminación por plomo, lo que se vincula directamente con el propósito de esta investigación: desarrollar un bioadsorbente a partir de este residuo agroindustrial y evaluar su efectividad en condiciones controladas de laboratorio.

Biosorbente. Los biosorbentes son materiales sólidos de origen biológico capaces de fijar contaminantes sobre su superficie mediante mecanismos físicos o químicos. Según Robalino-López et al. (2021), estos materiales pueden derivarse de microorganismos, residuos vegetales, algas o polisacáridos naturales, y tienen la capacidad de retener compuestos metálicos disueltos, como los iones de plomo, gracias a los grupos funcionales presentes en su estructura. Para mejorar su eficiencia en aplicaciones ambientales, estos biosorbentes suelen someterse a tratamientos físicos o químicos que aumentan su porosidad o activan sus sitios de adsorción.

Clases de Biosorbentes. Diversas investigaciones han demostrado que una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos pueden ser utilizados como bioadsorbentes para la remoción de metales pesados en aguas contaminadas. Según López-Luna et al. (2019), estos materiales pueden originarse tanto de biomasa viva, como bacterias, algas o hongos, como de biomasa muerta, en especial residuos agroindustriales ricos en lignina, celulosa o taninos. Asimismo, existen otros adsorbentes no orgánicos ampliamente estudiados, como el carbón activado, las zeolitas, las arcillas modificadas, la alúmina activada y algunos polímeros sintéticos, que han mostrado buena capacidad de retención de contaminantes metálicos. Esta diversidad de materiales evidencia el interés creciente por alternativas económicas, eficientes y sostenibles en la gestión de aguas residuales, como es el caso del uso de cáscara de naranja, propuesto en esta tesis como biosorbente natural para la eliminación de plomo en soluciones acuosas.

2.2.3. Metales Pesados

Los metales pesados son elementos con alta densidad y toxicidad incluso en bajas concentraciones, y su presencia en cuerpos de agua representa un riesgo significativo para la salud humana y el ambiente. De acuerdo con Jaishankar et al. (2014), estos metales, entre ellos el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y arsénico (As), no son biodegradables y tienden a acumularse en organismos vivos a lo largo de la cadena trófica, generando efectos crónicos como daños neurológicos, renales y reproductivos. Sus principales fuentes de contaminación están relacionadas con actividades industriales, mineras, agrícolas y el mal manejo de residuos. En ese contexto, se vuelve necesario desarrollar tecnologías que permitan remover eficientemente estos contaminantes. En esta tesis, se aborda específicamente la problemática del plomo, utilizando un bioadsorbente natural a base de cáscara de naranja como una alternativa sostenible para reducir su concentración en soluciones acuosas en condiciones controladas de laboratorio.

Plomo. El plomo (Pb) es un metal pesado ampliamente reconocido por su alto nivel de toxicidad y su capacidad para permanecer en el ambiente durante largos periodos. Su presencia en fuentes de agua se debe, en gran medida, a actividades humanas como la minería, la industria metalúrgica, la fabricación de baterías, el uso de combustibles con plomo y la inadecuada disposición de residuos industriales. De acuerdo con Tchounwou et al. (2012), incluso exposiciones mínimas a este metal pueden generar efectos adversos en la salud, tales como daños al sistema nervioso, afecciones renales y trastornos cardiovasculares, siendo especialmente peligrosas en niños, donde puede afectar el desarrollo neurológico. A diferencia de otros contaminantes, el plomo no se descompone ni se elimina de forma natural, lo que facilita su acumulación en los tejidos vivos y su transmisión a lo largo de la cadena alimentaria.

2.2.4. Impacto Ambiental de la Contaminación por Plomo

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados constituye un problema ambiental de gran persistencia y gravedad, especialmente por la toxicidad y la estabilidad química de estos elementos en el ambiente. En particular, el plomo (Pb) es uno de los metales más peligrosos debido a que, una vez liberado en el entorno, permanece por largos periodos y puede integrarse fácilmente a los ecosistemas acuáticos. Entre las principales fuentes de contaminación por plomo se encuentran la minería, los procesos industriales, la combustión de combustibles fósiles, y el mal manejo de residuos industriales como baterías o pinturas a base de plomo (Jaishankar et al., 2014). Este metal no solo contamina el agua, sino que también afecta a los organismos vivos, acumulándose en tejidos biológicos y trasladándose a través de la cadena alimentaria. La exposición crónica al plomo ha sido relacionada con efectos graves en la salud humana, incluyendo daños neurológicos, fallas renales, trastornos inmunológicos y problemas cardiovasculares. En poblaciones infantiles, incluso niveles bajos pueden afectar el desarrollo intelectual y conductual (Tchounwou et al., 2012).

En respuesta a estos riesgos, el Perú ha establecido límites regulatorios para controlar la presencia de metales pesados en cuerpos de agua. De acuerdo con el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua, el valor máximo permitido de plomo para uso en agua destinada al consumo humano es de 0.01 mg/L (MINAM, 2017). Sin embargo, en muchas zonas del país, especialmente aquellas cercanas a zonas mineras o sin sistemas adecuados de tratamiento, este valor es superado con frecuencia, lo que representa un riesgo significativo para las personas y el ambiente.

En ese contexto, resulta urgente el desarrollo de soluciones alternativas, sostenibles y de bajo costo para la remoción de plomo del agua. Una de las estrategias más viables es el uso de bioadsorbentes, materiales de origen natural capaces de capturar iones metálicos

a través de mecanismos fisicoquímicos. La presente investigación plantea el uso de cáscara de naranja, un residuo agroindustrial abundante, como bioadsorbente natural. Este material contiene compuestos como pectina, celulosa y lignina, que presentan grupos funcionales activos capaces de interactuar con iones de plomo, permitiendo su retención y remoción del medio acuoso. De este modo, el estudio busca evaluar la eficacia de este biosorbente en condiciones controladas de laboratorio como alternativa accesible para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo.

2.2.5. Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM

En el ámbito normativo peruano, la regulación de la calidad del agua incluye límites específicos para la presencia de metales pesados, con el fin de proteger tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos. El Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM establece los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para diferentes usos del recurso hídrico. Para el caso del plomo (Pb), la normativa fija un valor máximo permisible de 0.01 miligramos por litro (mg/L) en aguas destinadas al consumo humano, debido a la alta peligrosidad de este metal incluso en concentraciones muy bajas. Este límite refleja criterios internacionales, como los sugeridos por la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo, en distintas regiones del país, especialmente aquellas cercanas a zonas de explotación minera o sin acceso a sistemas adecuados de tratamiento, este estándar es superado con frecuencia. Esto pone en evidencia la necesidad de implementar soluciones prácticas y efectivas. En ese sentido, la presente investigación busca contribuir al cumplimiento de dicha normativa mediante la evaluación del uso de cáscara de naranja como bioadsorbente, orientado a disminuir la concentración de plomo en soluciones contaminadas hasta niveles aceptables según la legislación peruana.

2.2.6. Importancia Agronómica y Morfología de los Cítricos

Las especies cítricas se cultivan ampliamente por su valor económico y su capacidad de adaptarse a diversas condiciones agroclimáticas. Estas plantas, que pueden presentarse como arbustos o árboles de tamaño variable, se caracterizan por mantener un follaje verde y brillante a lo largo del año, lo cual no solo favorece la fotosíntesis continua, sino que también incrementa su valor ornamental. La presencia de flores fragantes, un tronco resistente y una estructura de ramas bien distribuida facilita su cultivo, poda y cosecha. En cuanto a su forma, la copa tiende a ser esférica u ovalada, aunque esta puede modificarse por factores como el tipo de portainjerto utilizado, la fertilidad del suelo, la disponibilidad de agua y las condiciones climáticas. Estas características morfológicas son claves para su desarrollo, rendimiento y adaptación, lo que convierte a los cítricos en uno de los cultivos frutales más importantes en regiones de clima cálido y templado (Palacios, 2005).

2.2.7. Clasificación Taxonómica de *Citrus Sinensis*

La especie empleada en esta investigación como materia prima para la elaboración del bioadsorbente es la naranja dulce, científicamente conocida como *Citrus sinensis* L. Osbeck, perteneciente a la variedad Valencia. Esta planta forma parte del reino Plantae y se encuentra clasificada dentro de la división Magnoliophyta, caracterizada por plantas con flores. Perteneció al orden Geraniales y a la familia Rutaceae, conocida por incluir especies productoras de aceites esenciales y frutos cítricos. Dentro de esta familia, se ubica en la subfamilia Aurantioideae, el género *Citrus* y, específicamente, en la especie *sinensis*. Esta clasificación refleja las características botánicas y fisiológicas de la planta, las cuales influyen directamente en la composición química de sus residuos, como la cáscara, cuyo contenido en pectina, celulosa y flavonoides la convierte en un recurso valioso para aplicaciones en tratamiento de aguas.

2.2.8. Características Generales y Aprovechamiento Agroindustrial de la Naranja Valencia

La variedad Valencia de la naranja dulce se destaca por ser una de las más producidas en el mundo, abarcando aproximadamente el 60 % del total de los cultivos de esta fruta (Palacios, 2005). En el ámbito agroindustrial, su uso principal está destinado a la elaboración de jugos, un proceso que genera altos volúmenes de residuos orgánicos. Se calcula que entre un 23 % y un 40 % del peso del fruto corresponde a la cáscara, la cual comúnmente es descartada sin tratamiento adecuado, generando impactos ambientales negativos debido a su acumulación (Marulanda, 2001; Cerón, 2011). No obstante, este subproducto posee características físico-químicas relevantes, como su riqueza en polisacáridos estructurales y compuestos bioactivos, que lo convierten en una materia prima viable para el desarrollo de bioadsorbentes utilizados en procesos de remediación ambiental).

2.2.9. Morfología del Fruto de la Naranja: Flavedo, Albedo y Pulpa

El fruto del naranjo es considerado una baya carnosa compuesta por varios carpelos, cuyas capas cumplen funciones diferenciadas tanto en la protección como en el contenido nutricional del fruto (Palacios, 2005; Primo, 1997).

La capa más externa, conocida como flavedo, corresponde al epicarpo. Esta región contiene vesículas especializadas donde se concentran aceites esenciales, pigmentos carotenoides y compuestos lipídicos que otorgan el color anaranjado y el aroma característico de los cítricos.

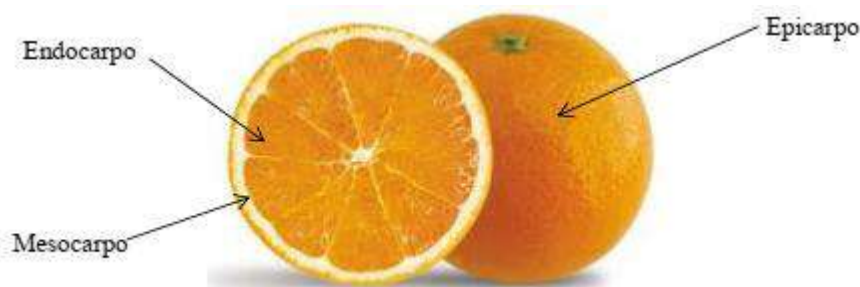
Debajo del flavedo se encuentra el albedo o mesocarpio, una capa interna de tonalidad blanca y textura esponjosa. Su composición está dominada por polisacáridos como celulosa, hemicelulosa y pectinas, lo que la convierte en una estructura útil para

aplicaciones tecnológicas como la adsorción de metales pesados. Además, contiene antioxidantes naturales como vitamina C y flavonoides.

En el interior del fruto se localiza el endocarpio, conformado por segmentos llenos de jugo, comúnmente llamados “gajos”, que representan la parte comestible del fruto y donde se concentra la mayor cantidad de líquido.

Figura 2

Morfología de la Naranja.



Fuente: Infoagro (2012).

2.2.10. Composición Física de la Naranja y Humedad del Albedo

De acuerdo con el análisis realizado por Hawkins (2012), la naranja presenta una distribución específica en sus componentes físicos. En promedio, cerca del 83,2 % del peso total del fruto corresponde a la pulpa, mientras que aproximadamente 11,0 % representa la cáscara externa o flavedo, y el 5,8 % restante corresponde al albedo, que es la parte interna blanca de la cáscara. Este último, además de su composición estructural rica en fibras naturales, posee un contenido de humedad cercano al 39,6 %, característica que contribuye a su naturaleza porosa. Esta porosidad resulta clave cuando el albedo es utilizado como material bioadsorbente, ya que favorece la captación y retención de contaminantes, como los metales pesados, durante procesos de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2.

Composición de la Naranja

Componente	Porcentaje en peso (%)	Observaciones
Pulpa (endocarpio)	83,2 %	Parte comestible jugosa del fruto
Cáscara externa (flavedo)	11,0 %	Contiene pigmentos, aceites esenciales y compuestos lipídicos
Cáscara interna (albedo)	5,8 %	Rica en celulosa, hemicelulosa y pectina
Humedad del albedo	39,6 %	Influye en su porosidad y capacidad adsorbente

Fuente: Adaptado de Hawkins (2012).

2.2.11. Condiciones Agroclimáticas para el Cultivo y Distribución Global de la Naranja

El desarrollo óptimo del cultivo de la naranja depende en gran medida de factores agroclimáticos, siendo la temperatura uno de los más determinantes. De acuerdo con FAO (2021), las temperaturas ideales para el crecimiento vegetativo de los cítricos oscilan entre 23 °C y 34 °C, aunque pueden tolerar rangos más amplios, siempre que las heladas sean mínimas o inexistentes. Las temperaturas inferiores a 13 °C o superiores a 39 °C pueden afectar negativamente el desarrollo del fruto, reduciendo su calidad y rendimiento. Además, se ha observado que en climas con alta humedad relativa, los frutos tienden a tener mayor contenido de jugo y cáscara más delgada, lo que mejora su calidad comercial (Cunha et al., 2020). En contraste, factores climáticos adversos como vientos intensos, heladas o granizadas pueden causar desde daños foliares y caída de frutos hasta pérdidas totales de cosechas.

En lo que respecta al tipo de suelo, los cítricos son especies que muestran gran adaptabilidad, creciendo en suelos de diversas texturas y composiciones, siempre que presenten buen drenaje y adecuada disponibilidad de nutrientes (García-Luengo et al., 2019).

En el plano productivo, la naranja es el cítrico de mayor producción mundial. Según datos de la FAO (2022), para el año 2020 la producción global de naranjas alcanzó los 75,6 millones de toneladas, siendo los principales países productores Brasil, China y Estados Unidos. Este cultivo tiene alta relevancia económica en regiones tropicales y subtropicales, tanto por su consumo interno como por su valor en la exportación de fruta fresca y jugo industrializado.

2.2.12. Propiedades Fisicoquímicas de la Cáscara de Naranja y su Potencial Adsorbente

La cáscara de naranja, como residuo agroindustrial, presenta características fisicoquímicas que la convierten en una materia prima prometedora para aplicaciones en remediación ambiental, especialmente en la adsorción de metales pesados. Según Pinzón et al. (s.f.), su composición elemental incluye aproximadamente 44,43 % de carbono (C), 6,10 % de hidrógeno (H), 0,89 % de nitrógeno (N) y un contenido de cenizas del 4,90 %. Estas proporciones reflejan una estructura rica en compuestos orgánicos, compatible con procesos de carbonización y activación. Además, la cáscara posee un poder calorífico de 15 910 kJ/kg, lo que indica su potencial energético, y una capacidad de intercambio iónico de 8,04 meq/100 g, propiedad clave que facilita su aplicación como bioadsorbente en sistemas de tratamiento de aguas contaminadas.

Tabla 3

Composición Fisicoquímica Aproximada de la Cáscara de Naranja (Citrus sinensis L. Osbeck)

Parámetro	Unidad	Valor Promedio ± DE
Sólidos solubles	°Brix	7,1 ± 1,2
pH	—	3,93 ± 0,03
Acidez total	g de ácido cítrico / 100 mL	0,29 ± 0,03

Parámetro	Unidad	Valor Promedio ± DE
Índice de formol	—	34 ± 2,4
Humedad	%	85,9 ± 1,6
Grasa	% (base seca)	1,55 ± 0,17
Cenizas	% (base seca)	3,29 ± 0,19
Proteína	% (base seca)	6,16 ± 0,23
Carbohidratos	% (base seca)	89,0 ± 1,1
Fibra soluble – azúcares neutros	% (base seca)	3,8 ± 0,3
Fibra soluble – ácido urónico	% (base seca)	1,04 ± 0,18
Fibra insoluble – azúcares neutros	% (base seca)	17,1 ± 1,6
Fibra insoluble – ácido urónico	% (base seca)	7,1 ± 0,9
Fibra insoluble – lignina	% (base seca)	3,2 ± 0,4
Pectina	% (base seca)	17,0 ± 4,0
Aceites esenciales	mL/kg	1,45 ± 0,16

Fuente: Adaptado de Espachs (2004).

2.2.13. Aplicaciones Tecnológicas y Agroindustriales de la Cáscara de Naranja

La cáscara de naranja, tradicionalmente considerada un residuo agroindustrial, ha demostrado ser un subproducto versátil con múltiples aplicaciones en diferentes sectores como la alimentación, la industria química y la biotecnología. A través de diversas técnicas de extracción, fermentación y procesamiento físico, es posible obtener compuestos de alto valor agregado. En la siguiente tabla se resumen algunos de los usos más destacados reportados en la literatura:

Tabla 4

Aplicaciones Tecnológicas y Agroindustriales de la Cáscara de Naranja

Área de aplicación	Producto obtenido	Técnica empleada / Características	Referencia
Alimentación funcional	Fibra dietaria	Obtenida a partir de mezclas con otros residuos vegetales; contenido de fibra del 74,63 %.	Aguilar (2002)
Industria alimentaria	Ácido láctico	Fermentación de extractos mediante prensado, centrifugación y filtración.	Gil et al. (2008)
Biotecnología vegetal	Pectina cítrica	Polisacárido gelificante extraído con un rendimiento aproximado del 10 %.	Devia (2002)
Industria cosmética y médica	Carotenoides	Pigmentos con propiedades antioxidantes, extraídos con hexano-éter (75:25).	Moreno et al. (2006)
Agroindustria animal	Harina para piensos	Harina formulada a partir de cáscara seca de naranja para alimentación de tilapia.	Moreno M. et al. (2000)
Química industrial	Aceites esenciales	Hidrodestilación del pericarpio de <i>Citrus sinensis</i> ; los aceites presentaron aspecto translúcido.	León (2015)
Colorantes naturales	Extractos pigmentarios	Métodos de extracción no convencionales utilizando agua como solvente.	Padrón et al. (1999)

Por otro lado, no se recomienda el compostaje de la cáscara de naranja y de los cítricos en general, ya que puede generar extractos de características fitotóxicas (López *et al.*, 2014).

2.2.14. Material Bioadsorbente de Cáscara de Naranja: Estructura, Composición y Potencial de Adsorción

El material obtenido a partir de biomasa vegetal como la cáscara de naranja, cuando es sometido a tratamientos térmicos controlados, desarrolla una estructura altamente porosa, rica en sitios activos capaces de retener contaminantes metálicos. Esta porosidad genera una superficie interna extensa, lo que favorece los procesos de adsorción, especialmente para metales pesados como el plomo (Martínez, 2012).

Durante su transformación, los compuestos volátiles presentes en el interior del material son eliminados mediante calor, lo cual amplifica la capacidad de retención del adsorbente. El resultado es un sólido de base orgánica, con una estructura tridimensional compuesta principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno (González, 2004). Su eficacia se debe a la presencia de poros de distintos tamaños que, según la IUPAC, se clasifican como microporos (< 2 nm), mesoporos (entre 2 y 50 nm) y macroporos (> 50 nm) (Menéndez, 2006).

Tabla 5

Clasificación de poros en materiales adsorbentes según su tamaño

Tipo de poro	Rango de tamaño (nm)	Características principales
Microporos	< 2	Son responsables de la mayor parte del área superficial; ideales para adsorción de moléculas pequeñas.
Mesoporos	2 – 50	Facilitan el transporte del adsorbato hacia los microporos; adecuados para moléculas medianas.
Macroporos	> 50	Actúan como canales de acceso o entrada; intervienen en la difusión del contaminante.

Fuente: Adaptado de Menéndez (2006), clasificación basada en criterios IUPAC.

Aunque en general se considera que una mayor superficie interna favorece el proceso de adsorción, no todos los poros resultan útiles si las moléculas del contaminante son más grandes que los canales disponibles. Por ello, la **compatibilidad entre el tamaño del ion de plomo y la geometría del poro** es un factor decisivo para la eficiencia del proceso (Menéndez, 2008).

El uso de **residuos lignocelulósicos**, como la cáscara de naranja, es especialmente ventajoso debido a su abundancia, bajo costo y contenido estructural favorable. Su

composición típica incluye un alto porcentaje de carbono (alrededor del 48 %), bajo contenido de ceniza, y componentes como celulosa, hemicelulosa y lignina, esta última determinante en la formación de estructuras porosas cuando se somete a calor (Molina et al., 2004; Wan, 2004).

Además de las propiedades físicas, la **química superficial** de este tipo de adsorbente también incide directamente en su rendimiento. La presencia de **grupos funcionales activos** como carboxilos, hidroxilos y fenoles permite interacciones electrostáticas y complejación con iones metálicos como el plomo. La disponibilidad y comportamiento de estos grupos pueden variar en función del **pH del medio**, lo cual debe considerarse al diseñar el proceso de adsorción (Drabrowski et al., 2005).

En conjunto, este tipo de **material bioadsorbente derivado de cáscara de naranja** reúne condiciones ideales para ser una solución ecológica, económica y efectiva en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, posicionándose como una alternativa prometedora frente a los adsorbentes sintéticos convencionales (Fombuena, 2009; Marsh, 2006).

2.2.15. Métodos de Activación para la Obtención de Bioadsorbentes

Las características físicas y químicas de un bioadsorbente de origen vegetal dependen en gran medida tanto del tipo de residuo empleado como del método de activación aplicado (Delgadillo, 2011). En el caso de materiales lignocelulósicos, como la cáscara de naranja, es esencial seleccionar un proceso de activación apropiado que permita desarrollar una estructura porosa eficiente, capaz de capturar eficazmente contaminantes del agua.

Existen dos enfoques principales para este proceso: la activación física y la activación química. En el primer caso, el residuo se somete a altas temperaturas en

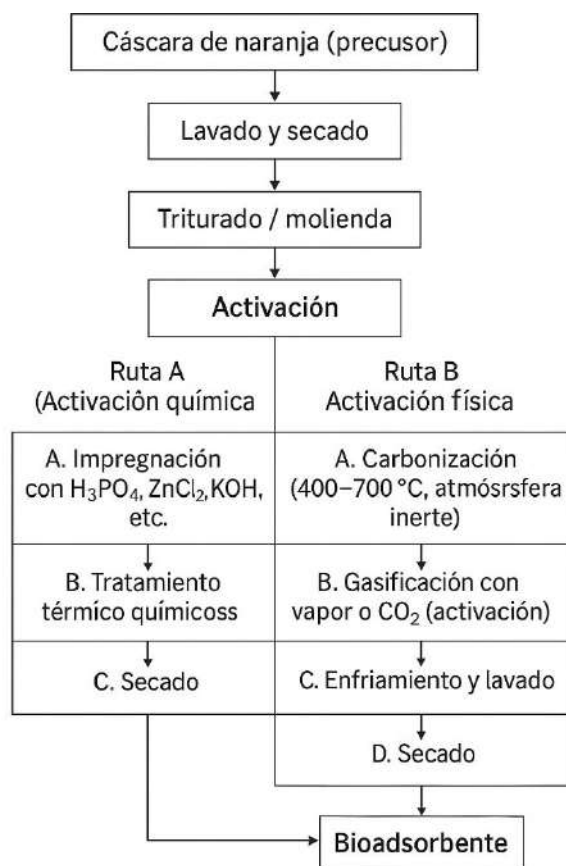
condiciones de atmósfera inerte, generando una matriz carbonosa que posteriormente se activa con gases como vapor de agua o dióxido de carbono. Esta fase promueve la apertura de poros al eliminar compuestos volátiles.

Por otro lado, la activación química implica el uso de agentes como el ácido fosfórico o el cloruro de zinc, los cuales son aplicados al precursor antes del tratamiento térmico. Este método suele desarrollarse a temperaturas más moderadas, favoreciendo la creación de una superficie activa adecuada para retener iones metálicos.

La eficiencia del bioadsorbente resultante está directamente relacionada con diversos factores, como el tipo de activación, el tiempo de exposición, la temperatura aplicada y el pretratamiento del material (Martínez, 2012). Gracias a estos procesos, es posible transformar residuos agroindustriales en materiales funcionales y sostenibles para la remoción de plomo y otros metales pesados del agua.

Figura 3

Flujograma General para la Producción de Bioadsorbente a Partir de la Cáscara de Naranja



2.2.16. Características Químicas del Bioadsorbente Obtenido a Partir de Cáscara de Naranja para la Remoción de Plomo

La aceptabilidad del bioadsorbente elaborado a partir de cáscara de naranja para la remoción de iones de plomo (Pb^{2+}) se evalúa a través de diversos parámetros químicos que determinan su efectividad. Uno de los principales es el pH del punto de carga cero (pH_{pzc}), el cual influye directamente en la atracción o repulsión de cationes metálicos en función del pH de la solución; valores típicos para bioadsorbentes de este tipo se encuentran entre 5 y 7. Asimismo, la presencia de grupos funcionales superficiales como carboxilos, hidroxilos y carbonilos, determinados por espectroscopía FTIR o titulación de Boehm, es esencial para la interacción con los iones metálicos. Estos grupos incrementan la capacidad de intercambio iónico (CIE), lo cual favorece la adsorción de plomo. Además, el análisis elemental (CHNS/O) permite conocer la proporción de oxígeno en la estructura del bioadsorbente, indicador clave de su reactividad superficial. Otro parámetro relevante es el

contenido de cenizas, que debe mantenerse por debajo del 10% para evitar interferencias en la adsorción. Finalmente, la capacidad de adsorción específica del bioadsorbente frente al plomo, expresada en mg/g, suele oscilar entre 50 y 150 mg/g, dependiendo del método de activación y las condiciones experimentales, lo que evidencia el potencial de la cáscara de naranja como un material alternativo, sostenible y eficiente en la remoción de metales pesados a nivel de laboratorio.

Tabla 6

Principales Parámetros con los que se Especifica un Bioadsorbente Tipo Carbón Activado para el Tratamiento de Agua Contaminada con Plomo.

Parámetro	Unidades en las que se expresa	Rango de valores típicos
Área superficial	m ² /g	500 a 1200
Densidad aparente	g/cm ³	0,26 a 0,65
Tamaño efectivo de partícula	mm	0,4 a 3,3
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11
Humedad (al empacar)	%	2 a 15

Fuente: Adaptado de la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México (s.f.).

2.2.17. Clasificación de Bioadsorbentes a Base de Carbón Activado Utilizados en la Remoción de Plomo

Los materiales adsorbentes obtenidos a partir de biomasa, como la cáscara de naranja, pueden agruparse según el tamaño de sus partículas, similar a los carbones activados convencionales. En este contexto, se distinguen principalmente dos tipos: carbón activado en polvo (CAP), con partículas muy finas que suelen medir entre 15 y 25

micrómetros, y carbón activado granular (CAG), cuyas partículas varían generalmente entre 1 y 5 milímetros. Según la norma ASTM (1976), el CAP se emplea habitualmente en medios líquidos y en procesos por lote, ya que su tamaño reducido permite una rápida interacción con los contaminantes. Por otro lado, el CAG puede utilizarse tanto en líquidos como en gases, y se adapta bien a sistemas de flujo continuo, como los que se emplean en tratamientos industriales.

Cuando el tamaño de las partículas del adsorbente es superior a la malla N° 80, se considera un material granular, ideal para sistemas de columna y flujos constantes. En cambio, cuando las partículas son más pequeñas que dicha malla, se clasifica como polvo, lo que resulta útil en estudios de laboratorio por su alta superficie reactiva. Además de estas presentaciones tradicionales, también existen formas especializadas de adsorbentes conocidas como “estructuras conformadas”, entre las cuales se encuentran fibras, telas, filtros, membranas y otros formatos compactos o aglomerados (Menéndez, 2008). Estas alternativas amplían las posibilidades de aplicación del bioadsorbente en función de la configuración del tratamiento y del tipo de contaminante a remover, como el plomo (Pb^{2+}) en este estudio.

2.2.18. Aplicaciones de Bioadsorbentes en el Tratamiento de Aguas Contaminadas con

Plomo

El carbón activado, reconocido por su alta eficiencia en procesos de adsorción, ha sido ampliamente utilizado en diversas industrias. Aproximadamente el 40 % de su producción global se destina a sectores como el alimentario, químico y farmacéutico, mientras que otro 40 % se aplica en procesos de potabilización y tratamiento de aguas residuales, generalmente en conjunto con métodos físico-químicos o biológicos. Un pequeño porcentaje, cercano al 5 %, se emplea como soporte para catalizadores, y el resto se utiliza en áreas como la minería, la recuperación de metales, la producción energética y

otros procesos industriales (Auer et al., 1998; Torné, 2006; Rey et al., 2009; Concheso et al., 2006).

Según Martínez (2012), las aplicaciones del carbón activado pueden clasificarse en tres funciones principales: como material adsorbente, como catalizador, y como soporte catalítico. Para aplicaciones en fase gaseosa, se favorecen estructuras altamente microporosas con superficies específicas mayores a 1000 m²/g, lo que garantiza una adsorción eficiente. En cambio, para el tratamiento de aguas —como es el caso de esta investigación— se requieren materiales con una proporción significativa de macroporos, ya que estos facilitan la difusión hacia los mesoporos y microporos internos (Marsh, 2006).

En sistemas acuosos, el uso de carbón activado es más eficiente cuando la carga orgánica no supera los 2 g/L de DQO (demanda química de oxígeno), debido a que la regeneración del material es clave para mantener la viabilidad económica del proceso (Sheintuch et al., 1999). Adicionalmente, el carbón activado tiene múltiples aplicaciones como la purificación de gases industriales, la eliminación de cafeína, el tratamiento de aguas potables, la medicina, la fabricación de filtros de aire, la purificación de oro, el almacenamiento de energía, entre otros usos (Roopa, 2016).

El desarrollo de bioadsorbentes a partir de residuos como la cáscara de naranja busca replicar las propiedades funcionales del carbón activado convencional, con el objetivo de ofrecer soluciones sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, particularmente plomo (Pb²⁺), en entornos de laboratorio o en pequeña escala.

2.3. Definiciones Conceptuales

Adsorción: Es un proceso superficial en el cual moléculas, átomos o iones se acumulan sobre la superficie de un sólido sin penetrar en su estructura interna (Marsh, 2006).

Bioadsorbente: Material de origen biológico, frecuentemente residual, utilizado para retener contaminantes en soluciones acuosas mediante interacciones fisicoquímicas como la adsorción (Martínez, 2012).

Carbón activado: Sólido carbonoso con elevada porosidad y gran área superficial, empleado ampliamente en procesos de purificación por su capacidad adsorbente. Puede ser producido a partir de residuos como cáscaras de frutas mediante procesos térmicos o químicos (Torné, 2006).

Cáscara de naranja: Subproducto agroindustrial rico en polisacáridos, grupos carboxilo y fenólicos, lo cual la convierte en un precursor adecuado para la obtención de bioadsorbentes sostenibles (Rey et al., 2009).

Contaminante metálico: Sustancia inorgánica, como el plomo, que se encuentra disuelta en el agua y cuya toxicidad representa un riesgo para la salud humana y los ecosistemas (Sheintuch et al., 1999).

Demanda química de oxígeno (DQO): Indicador que estima la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada químicamente en el agua. Se expresa en mg O₂/L y sirve para evaluar la carga contaminante (Roopa, 2016).

Fase líquida: Estado de la materia donde las moléculas están en contacto pero con libertad de movimiento. En adsorción, se refiere al medio acuoso que contiene los contaminantes a tratar (Concheso et al., 2006).

Granulometría: Distribución del tamaño de partículas en un sólido, la cual influye directamente en la eficiencia de adsorción debido a la variación de área superficial (Marsh, 2006).

Macroporos, mesoporos y microporos: Clasificación de los poros en función de su tamaño: macroporos (>50 nm), mesoporos (2–50 nm) y microporos (<2 nm). Cada tipo influye en la accesibilidad y adsorción del contaminante (Marsh, 2006).

Metal pesado: Elemento con alta densidad y toxicidad, como el plomo (Pb^{2+}), que puede causar efectos adversos en la salud humana aun a concentraciones bajas (Roopa, 2016).

pH: Parámetro químico que mide la concentración de iones hidrógeno en una disolución, afectando la forma química del adsorbato y la funcionalidad del adsorbente (Martínez, 2012).

Porosidad: Propiedad que indica la fracción del volumen total de un sólido que está compuesta por espacios vacíos. Alta porosidad está relacionada con mayor capacidad de retención de contaminantes (Torné, 2006).

Remoción de plomo: Proceso mediante el cual se elimina el ion Pb^{2+} de soluciones acuosas utilizando materiales adsorbentes, especialmente en tratamientos de agua contaminada (Rey et al., 2009).

Solución acuosa: Mezcla homogénea en la que el agua actúa como disolvente. En el caso del tratamiento de aguas, estas soluciones contienen contaminantes como metales pesados (Sheintuch et al., 1999).

Tratamiento de aguas residuales: Conjunto de técnicas y procesos dirigidos a la eliminación o reducción de contaminantes en aguas que han sido utilizadas, con el objetivo de permitir su reutilización o disposición segura (Auer et al., 1998).

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

H₁: El bioadsorbente obtenido a partir de cáscara de naranja calcinada remueve eficientemente iones de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas bajo condiciones controladas de laboratorio.

2.4.2. Hipótesis específicas

H_{1.1}: La concentración de plomo en las soluciones acuosas disminuye significativamente después del tratamiento con el bioadsorbente de cáscara de naranja calcinada.

H_{1.2}: La masa del bioadsorbente y la temperatura de calcinación influyen significativamente en la eficiencia de remoción de plomo (Pb^{2+}).

2.4.3. Hipótesis Nula

H₀: No existe una relación significativa entre la masa del bioadsorbente, la temperatura de calcinación y la eficiencia de remoción de plomo (Pb^{2+}) en solución acuosa.

2.5. Operacionalización de Variables

Tabla 7.

Operacionalización de la Variable.

Variable	Dimensión	Indicador	Técnica / Instrumento	Unidad de Medida
Independiente 1 Temperatura de calcinación	Tratamiento térmico aplicado a la cáscara	Grado de temperatura aplicada durante la calcinación	Horno mufla / termómetro digital	°C
Independiente 2 Masa del bioadsorbente	Cantidad de material aplicado	Peso del bioadsorbente usado	Balanza analítica	g (gramos)
Dependiente Remoción de plomo (Pb ²⁺)	Adsorción en soluciones acuosas	Diferencia entre concentración inicial y final de Pb	Espectrofotometría UV-Vis o método volumétrico	mg/L y % de remoción
Controladas	pH, tiempo de contacto, volumen de solución	pH del medio, tiempo de adsorción, volumen constante	pH-metro, cronómetro, agitador magnético	pH, minutos, mL

2.6. Matriz de Consistencia

Tabla 8.

Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Técnicas e Instrumentos
¿Cómo influye la temperatura de calcinación y la masa del bioadsorbente obtenido de cáscara de naranja en la eficiencia de remoción de plomo en soluciones acuosas?	Evaluar la eficiencia del bioadsorbente obtenido a partir de cáscara de naranja calcinada para la remoción de iones de plomo (Pb^{2+}) en soluciones acuosas.	H ₁ : El bioadsorbente obtenido a partir de cáscara de naranja calcinada remueve eficientemente plomo en soluciones acuosas bajo condiciones controladas.	Independiente: Temperatura de calcinación Masa del bioadsorbente Dependiente: Remoción de Pb^{2+}	Horno mufla, termómetro, balanza, espectrofotómetro UV-Vis, bureta
¿Qué procedimiento permite elaborar el bioadsorbente a partir de cáscara de naranja?	Diseñar el procedimiento experimental para la obtención del bioadsorbente.	—	—	Revisión bibliográfica, diseño experimental, protocolo de laboratorio
¿Qué cambios se observan en la concentración de plomo antes y después del tratamiento?	Determinar la concentración de plomo en las soluciones antes y después del tratamiento.	H _{1.1} : La concentración de plomo disminuye significativamente tras el tratamiento con bioadsorbente.	Variable dependiente: concentración de plomo	Método volumétrico o espectrofotometría UV-Vis
¿Cuáles son los parámetros óptimos de operación para la remoción de plomo con este bioadsorbente?	Determinar los parámetros de operación más adecuados (masa y temperatura).	H _{1.2} : La masa del bioadsorbente y la temperatura de calcinación influyen significativamente en la eficiencia de remoción de plomo.	Independientes: masa y temperatura Dependiente: eficiencia	Diseño factorial, análisis estadístico ANOVA

Capítulo III. Metodología

3.1. Diseño Metodológico

3.1.1. Enfoque

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo porque se basa en la recopilación y procesamiento de datos medidos con precisión en condiciones de laboratorio. A través de este enfoque, se busca identificar cómo varía la eficiencia del bioadsorbente, elaborado a partir de cáscara de naranja, frente a distintas condiciones experimentales, como la cantidad utilizada y la temperatura de tratamiento térmico. Esta perspectiva permite interpretar los resultados de forma objetiva, facilitando el análisis comparativo entre diferentes tratamientos.

3.1.2. Tipo de Investigación

Este trabajo se clasifica como una investigación de carácter aplicado, ya que tiene como propósito enfrentar una problemática ambiental concreta mediante el desarrollo de un material alternativo para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo. Al emplear un residuo orgánico como materia prima, se fomenta el aprovechamiento de recursos naturales y se promueve una solución viable, económica y sostenible que podría implementarse en contextos reales para mitigar los efectos de la contaminación.

3.1.3. Nivel de Investigación

En cuanto a su nivel, esta investigación es de tipo explicativo porque pretende ir más allá de la simple descripción del comportamiento del sistema, buscando comprender las razones por las cuales ciertas variables influyen en la capacidad de remoción del plomo. Analizar el impacto de factores como la masa del bioadsorbente y la temperatura de calcinación permite establecer vínculos causales que explican el fenómeno observado,

aportando conocimientos relevantes sobre los mecanismos involucrados en el proceso de adsorción.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

En este estudio, la población está constituida por soluciones acuosas contaminadas con plomo que pueden tratarse mediante bioadsorbentes elaborados a partir de residuos orgánicos. Se consideran especialmente aquellas soluciones que, como las empleadas en laboratorio, contienen nitrato de plomo a una concentración de 0.01 M, representando así un escenario controlado de contaminación del agua.

3.2.2. Muestra

Para la muestra, se prepararon en laboratorio varias soluciones con una concentración de nitrato de plomo de 0.01 M, las cuales simulan aguas contaminadas. Estas soluciones se dividieron en volúmenes específicos y se sometieron a tratamientos con distintas cantidades de bioadsorbente obtenido de cáscara de naranja calcinada a 400 °C y 500 °C. La selección de estas muestras se hizo de forma intencional y siguiendo un diseño experimental no probabilístico, acorde con los objetivos del estudio..

3.3. Recursos Empleados en la Etapa Experimental

3.3.1. Materiales y Reactivos para la Producción y Activación del Bioadsorbente

Cáscaras de naranja frescas (materia prima)

Horno para calcinación (temperaturas de 400 °C y 500 °C)

Licuada o procesador para alimentos

Tamices para obtener tamaño de partícula uniforme

Balanza analítica para medir masa con precisión

Recipientes resistentes al calor para calcinación

Equipo de protección personal (guantes, gafas, bata)

Estufa o secador para deshidratar las cáscaras

Ácido fosfórico (H_3PO_4) al 30%

Material para lavado y neutralización (agua destilada, recipientes)

Horno o Estufa

3.3.2. *Materiales para Preparar las Soluciones Contaminadas*

Nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) grado analítico

Agua destilada o desionizada

Probetas y matraces aforados

Vasos de precipitados

Agitador magnético o varillas de agitación

3.3.3. *Materiales y Recursos para el Proceso de Adsorción*

Frascos o recipientes para los experimentos (ej. 100 mL)

Balanza analítica para pesar 0.5 g y 1.0 g de bioadsorbente activado

Agitador mecánico o manual para asegurar mezcla homogénea

Pipetas para manejo preciso de volúmenes

3.3.4. *Materiales y Recursos para la Medición de la Remoción de Plomo*

Xileno de naranja (Indicador)

EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) o sal disódica de EDTA (0.01 Molar): agente quelante utilizado como titulante para complejar el ion plomo (Pb^{2+}) durante la valoración.

Solución tampón de pH 5-6 (Ácido Acético-Acetato de Sodio): para mantener el pH adecuado durante la titulación, ya que la reacción de complejación del plomo con EDTA.

Agua destilada: para preparar soluciones y diluciones.

Solución estándar de plomo: para calibrar la concentración del titulante o validar el procedimiento. Se prepara con nitrato de plomo en concentración conocida.

Ácido nítrico (HNO_3) diluido: para acidificar o preparar muestras si es necesario (dependiendo del procedimiento).

3.4.Procedimiento Experimental

3.4.1. Selección y recolección del residuo vegetal

Comenzamos con la obtención de cáscaras de naranja procedentes de frutas sanas, sin presencia de hongos ni descomposición. Se recomienda que provengan de fuentes confiables para asegurar la calidad del material. Esta etapa define la base del bioadsorbente, ya que la composición de la biomasa puede influir significativamente en su rendimiento (Bello et al., 2021).

3.4.2. Limpieza para eliminación de impurezas

Las cáscaras recolectadas se lavan cuidadosamente con abundante agua destilada para retirar polvo, azúcares, residuos orgánicos y posibles agentes contaminantes adheridos. Este paso es fundamental para evitar que estos compuestos interfieran con la

activación química posterior y afecten la capacidad adsorbente del material final (Santos et al., 2022).

3.4.3. *Secado controlado del material*

Una vez limpias, las cáscaras se disponen en bandejas limpias y se someten a secado. Puede realizarse mediante secado solar controlado o con una estufa a temperatura constante de entre 60 y 80 °C, durante varias horas, hasta que no quede humedad aparente. La eliminación del contenido de agua es crucial para asegurar una tritución efectiva (Moreno-Piraján & Giraldo, 2023).

3.4.4. *Trituración primaria y tamizado*

Tras el secado, el material vegetal se tritura manual o mecánicamente hasta obtener partículas de menor tamaño. Estas se tamizan con una malla estándar (por ejemplo, número 60) con el objetivo de lograr una distribución granulométrica homogénea. El tamaño de partícula incide directamente en la superficie de contacto durante el proceso de adsorción (Kong et al., 2020).

3.4.5. *Activación química del precursor*

El polvo de cáscara tamizado se mezcla con una solución activante, como ácido fosfórico (30–50 %), utilizando una proporción peso/volumen de 1:3. La mezcla se mantiene en contacto durante 12 a 24 horas a temperatura ambiente para permitir que los reactivos modifiquen químicamente la estructura lignocelulósica, generando precursores con mejor porosidad (Santos et al., 2022).

3.4.6. *Lavado para neutralización del exceso de reactivo*

Una vez finalizada la activación, se realiza un lavado intensivo con agua destilada hasta que el pH del filtrado sea neutro (pH ~7). Esta etapa permite remover el exceso de

agente químico, evitando que interfiera en futuras pruebas de adsorción y protegiendo el entorno experimental (Moreno-Piraján & Giraldo, 2023).

3.4.7. *Secado posterior al lavado*

El material lavado se coloca nuevamente en un horno de secado entre 100 y 105 °C durante 12 horas o más, hasta eliminar completamente el agua retenida. Esta etapa asegura que el bioadsorbente no sufra cambios físicos durante el tratamiento térmico posterior y conserva sus propiedades superficiales (Bello et al., 2021).

3.4.8. *Calcinación o tratamiento térmico en mufla*

El material seco se introduce en un crisol refractario y se lleva a un horno tipo mufla para su carbonización. Se aplican temperaturas de 400 o 500 °C durante un periodo de entre 1 y 2 horas, según el diseño experimental. Durante esta etapa se generan los poros y estructuras carbonosas activas responsables de la capacidad de adsorción del bioadsorbente (Kong et al., 2020).

3.4.9. *Molienda final y ajuste granulométrico*

Una vez frío, el material carbonizado se vuelve a triturar cuidadosamente para reducirlo a polvo fino. Se tamiza con malla más fina (por ejemplo, malla 100), garantizando un tamaño óptimo para mejorar el contacto entre el adsorbente y las soluciones contaminadas por plomo (Santos et al., 2022).

3.4.10. *Almacenamiento del producto terminado*

El bioadsorbente final se guarda en frascos de vidrio o plástico, limpios y herméticos, debidamente etiquetados. Se deben conservar en condiciones secas, alejados de la luz solar y fuentes de humedad, para evitar deterioro físico o químico antes de su uso en ensayos de adsorción (Moreno-Piraján & Giraldo, 2023).

3.5. Técnicas de Recolección de Datos

En este experimento, donde se busca comprobar qué tan efectivo es un bioadsorbente hecho con cáscara de naranja para quitar plomo de soluciones de agua, es importante usar métodos que nos permitan recoger datos confiables y fáciles de analizar. A continuación, se explican las formas que se usarán para recolectar esa información.

3.5.1. Observación en el laboratorio

Durante todo el procedimiento se hará una observación directa, prestando atención a lo que sucede en cada etapa del experimento. Se anotarán cambios visibles como el color de las soluciones, si aparecen residuos sólidos o si el bioadsorbente cambia su textura. Esto servirá para tener una idea más clara de cómo reacciona el sistema.

3.5.2. Registro de datos numéricos

Se llevará un control de varios datos importantes como la cantidad de bioadsorbente usada (0.5 g y 1.0 g), la temperatura a la que se calcinó (400 °C o 500 °C), el volumen de las soluciones, el tiempo de contacto entre el plomo y la cáscara, y el pH antes y después del tratamiento. Todo esto se anotará en tablas o en Excel para después analizarlo con más detalle.

3.5.3. Titulación para medir el plomo

Para conocer la cantidad de plomo que permanece en las soluciones luego de aplicar el bioadsorbente elaborado a partir de cáscara de naranja, se empleó una técnica analítica conocida como titulación complexométrica. Este procedimiento se basa en el uso de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), una sustancia que forma compuestos estables con metales pesados como el ion Pb^{2+} . Como indicador se utilizó xileno de naranja, que permite visualizar el punto final de la reacción mediante un cambio de color de rojo a amarillo, lo cual indica que todos los iones de plomo han reaccionado con el EDTA.

La titulación se llevó a cabo en un entorno ácido moderado, controlado por un tampón preparado con ácido acético y acetato de sodio, con un pH ajustado aproximadamente a 5,5. Estas condiciones favorecen la estabilidad del complejo plomo-EDTA y aseguran un viraje claro del indicador. Esta metodología está respaldada por la norma ISO 13545:2000, la cual establece un procedimiento normalizado para la determinación de plomo mediante este tipo de titulación. Además, estudios como el de Huang y Xie (2013) han demostrado que el uso del xileno de naranja junto con el tampón acético proporciona resultados confiables, con porcentajes de recuperación del metal superiores al 98 %, lo que respalda su precisión y utilidad.

Finalmente, se midió el volumen de EDTA consumido para cada muestra, con lo cual se calculó la concentración final de plomo en la solución. A partir de estos valores, se estimó el porcentaje de remoción del metal utilizando la fórmula:

Ecuación 1

Porcentaje de Remoción de Plomo de las Muestras Tratadas

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

donde C_i representa la concentración inicial del plomo y C_f la concentración final tras el tratamiento. Este cálculo permite evaluar de manera cuantitativa la eficacia del bioadsorbente desarrollado en el proceso de descontaminación de las soluciones acuosas.

3.5.4. Comparación de resultados

Finalmente, se compararán las concentraciones de plomo antes y después del tratamiento. Con eso se podrá calcular el porcentaje de remoción y ver qué combinación de condiciones (peso del bioadsorbente y temperatura de calcinación) dio mejores resultados.

También se podrán usar algunos cálculos básicos como promedios o desviaciones para analizar mejor los datos obtenidos.

3.6. Técnicas para el Procesamiento de la Información

Para este experimento se utilizó un diseño factorial 2x2 con tres repeticiones por cada tratamiento, con el objetivo de evaluar cómo afectan la masa del bioadsorbente (0.5 g y 1.0 g) y la temperatura de calcinación (400 °C y 500 °C) en la eficiencia de remoción del plomo. Todos los resultados fueron procesados mediante el programa estadístico Minitab, donde se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar si los factores estudiados tenían un efecto significativo por separado o en combinación. También se generaron gráficos de interacción y de efectos principales para observar mejor las tendencias de los datos. Las tres réplicas por tratamiento permitieron obtener una mayor precisión en los resultados, lo que ayudó a minimizar errores y a respaldar mejor las conclusiones del estudio.

3.7. Diseño experimental

La temperatura de calcinación y masa del bioadsorbente como variables independientes, asimismo el porcentaje de remoción de plomo como variable dependiente o respuesta. Los niveles de cada variable o factor se resumen a continuación en la Tabla 5.

Tabla 9

Factores Independientes

Variable	Niveles	Código
Temperatura Calcinación (grados centígrados) (A)	400	1
	500	2
Masa del bioadsorbente (gramos) (B)	0.5	1
	1.0	2

Se construirá la matriz de diseño experimental en base a un diseño factorial 2X2 con tres réplicas para disminuir el margen de error que se pueda cometer en la reproducibilidad de cada tratamiento, asimismo obtener datos mas confiables y aproximados a la realidad

Tabla 10

Resumen del Diseño Factorial 2x2

Factores:	2	Réplicas:	3
Corridas base:	4	Total, de corridas:	12
Bloques base:	1	Total, de bloques:	1

*Número de niveles: 2; 2

Tabla 11

Tabla Aleatorizada de Diseño Codificada

Corrida	Blq	A	B
1	1	2	1
2	1	1	2
3	1	2	2
4	1	1	1
5	1	2	1
6	1	1	1
7	1	1	2
8	1	2	2
9	1	2	1
10	1	2	2
11	1	1	1
12	1	1	2

**“A” y “B” véase la Tabla 5.

*Los números en la columna “A” y “B” son los niveles codificados según la Tabla 5.

Tabla 12

Matriz de Diseño Experimental (Factorial 2x2 con tres réplicas)

Orden de Corrida	Tipo de Punto	Bloques	Temperatura	Masa
1	1	1	500	0.5
2	1	1	400	1.0
3	1	1	500	1.0
4	1	1	400	0.5
5	1	1	500	0.5
6	1	1	400	0.5
7	1	1	400	1.0
8	1	1	500	1.0
9	1	1	500	0.5
10	1	1	500	1.0
11	1	1	400	0.5
12	1	1	400	1.0

Capítulo IV. Análisis de Resultados

4.1. Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja)

4.1.1. Acidez Volátil

Tabla 13

Acidez Volátil de la Cáscara de Naranja

Muestras	Volumen del extracto (mL)	Volumen NaOH 0.1N (mL)	Acidez volátil (g ácido acético / 100g muestra)	Promedio	Desviación Estándar
01	10.0	3.4	0.405	0.41	0.010
02	10.0	3.5	0.417		
03	10.0	3.3	0.397		

* Muestra de 10 gramos de cáscara de naranja seca.

4.1.2. Porcentaje de Cenizas

Tabla 14

Porcentaje de Cenizas de la Cáscara de Naranja

Muestras	Masa de muestra (g)	Masa del residuo (g)	% Cenizas calculado	Promedio	Desviación Estándar
01	5.000	0.385	7.70%	7.73%	0.20%
02	5.000	0.390	7.80%		
03	5.000	0.380	7.60%		

* Las muestras fueron calcinadas en un horno mufla a alta temperatura hasta alcanzar peso constante. Este procedimiento permite determinar el contenido de cenizas, que representa la fracción inorgánica no volátil del bioadsorbente, y es un indicador importante para evaluar su composición mineral y estabilidad térmica.

4.1.3. Porcentaje de Humedad

Tabla 15

Porcentaje de Humedad de la Cáscara de Naranja

Muestras	Masa inicial (g)	Masa post-secada (g)	Pérdida por secado (%)	Promedio	Desviación Estándar
01	5.000	4.315	13.70	13.93	0.304
02	5.000	4.297	14.06		
03	5.000	4.275	14.03		

* Después del proceso de secado, las muestras fueron colocadas en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, con el fin de evitar la absorción de humedad del entorno y asegurar la estabilidad de la medición final de masa.

*Temperatura de secado rango de 100-105°C.

4.2.Determinación del Porcentaje de Remoción Plomo

Se preparó como muestra patrón una disolución de nitrato de plomo a 0.01M, se tomaron 50 mililitros como muestras para simular el agua contaminada, las cuales se pusieron en contacto durante 24 horas con el bioadsorbente obtenido a diferente temperatura de calcinación y variando la masa. Pasado el tiempo se filtró cada muestra y agregó 5ml de solución tampón de ácido acético-acetato de sodio cuyo pH era aproximadamente en el rango 5-5.5. Se agregó unas gotas del indicador xilenol de Naranja y procedió a titular con una solución de EDTA a 0.01M. Los volúmenes registrados, así como concentraciones se registran en la Tabla 12.

Tabla 16

Titulación de las Muestras Contaminadas de Plomos Tratadas con el Bioadsorbente de Cáscara de Naranja.

Orden de Corrida	Temperatura	Masa	Volúmen Gastado EDTA (mL)	Concentración Pb(NO) ₂ (molar)	pH
1	500	0.5	35.1	0.0070	5.35
2	400	1.0	20.6	0.0041	6.20
3	500	1.0	30.1	0.0060	5.65
4	400	0.5	24.3	0.0049	5.95
5	500	0.5	36.5	0.0073	5.30
6	400	0.5	31.5	0.0063	5.75
7	400	1.0	21	0.0042	6.15
8	500	1.0	29.4	0.0059	5.70
9	500	0.5	35.3	0.0071	5.32
10	500	1.0	28.6	0.0057	5.75

11	400	0.5	23.3	0.0047	6.00
12	400	1.0	19.4	0.0039	6.25

*La concentración de la solución de EDTA es 0.01M.

*Cada muestra tratada con el bioadsorbente es de 50mL.

*El pH inicial de la disolución de nitrato de plomo es de 5.51.

Con los resultados registrados del volumen gastado de la solución EDTA en la **Tabla 12** se halla la concentración de la muestra tratadas con el bioadsorbente de cáscara de naranja, con este dato determinamos la concentración final según la **Ecuación 1**.
Obteniendo así la **Tabla 13** con la cual se procederá a modelar y analizar empleando el diseño creado en Minitab,

Tabla 17

Porcentaje de Remoción de Plomo de las Muestras Contaminadas a Través del bioadsorbente de Cáscara de Naranja.

Orden de Corrida	Temperatura	Masa	%Remocion
1	500	0.5	29.8
2	400	1.0	58.8
3	500	1.0	39.8
4	400	0.5	51.4
5	500	0.5	27.0
6	400	0.5	37.0
7	400	1.0	58.0
8	500	1.0	41.2
9	500	0.5	29.4
10	500	1.0	42.8
11	400	0.5	53.4
12	400	1.0	61.2

Tabla 18

Síntesis del Modelo Factorial 2X2 con 3 réplicas construido en Minitab

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4,67369	89,30%	85,29%	75,93%

Tabla 19

Análisis de Varianza del Modelo Factorial 2X2 con 3 réplicas

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1458.70	486.23	22.26	0.000
Lineal	2	1458.54	729.27	33.39	0.000
Temperatura	1	1004.67	1004.67	45.99	0.000
Masa	1	453.87	453.87	20.78	0.002
Interacción de 2 factores	1	0.16	0.16	0.01	0.933
Temperatura*Masa	1	0.16	0.16	0.01	0.933
Error	8	174.75	21.84		
Total	11	1633.45			
Modelo	3	1458.70	486.23	22.26	0.000

Ecuación 2

Ecuación de Regresión del Diseño Experimental

$$\%R = 111.2 + 20,4 \times m - 0,1900 \times T + 0,009 \times m \times T$$

Donde %R es el porcentaje de remoción de plomo, m es la masa del bioadsorbente de cáscara de naranja (gramos) y T es la temperatura de calcinación del proceso de obtención del bioadsorbente (° Grados Celsius).

Figura 4

Diagrama de Efectos Estándar (Pareto) para los Efectos Estandarizados del Diseño Experimental.

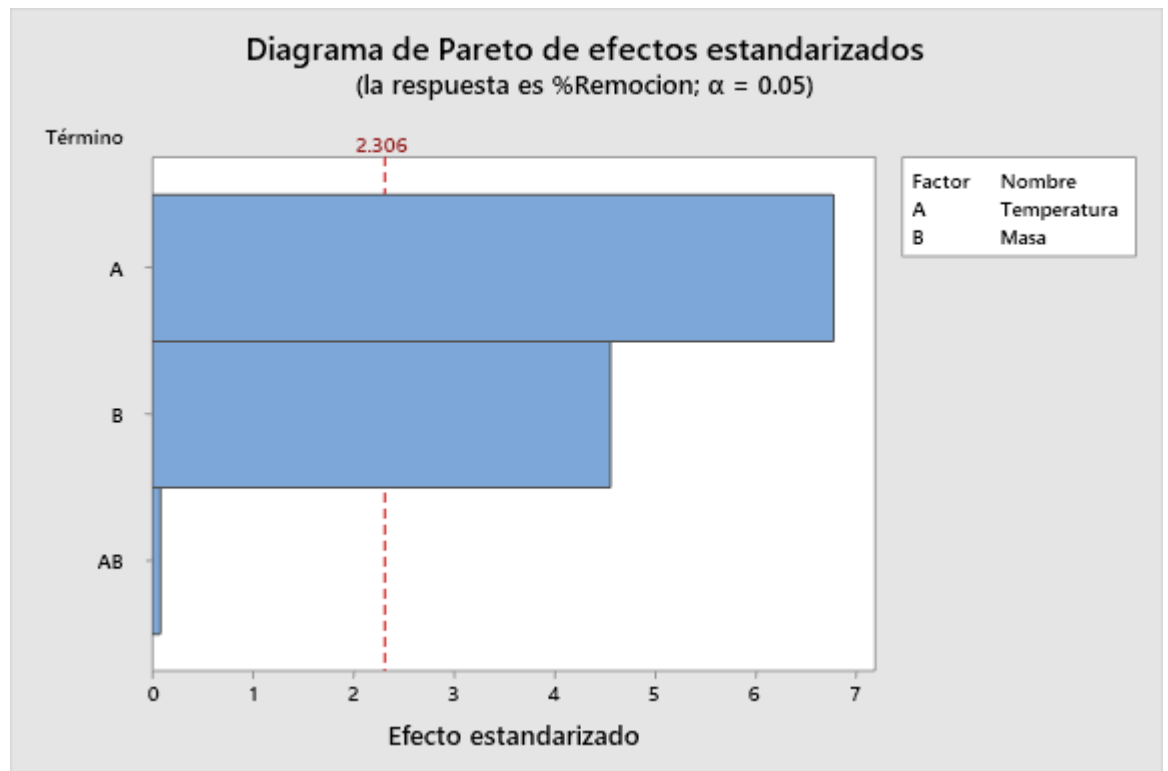


Figura 5

Gráficas de residuos para el Modelo de Regresión del Diseño Experimental.

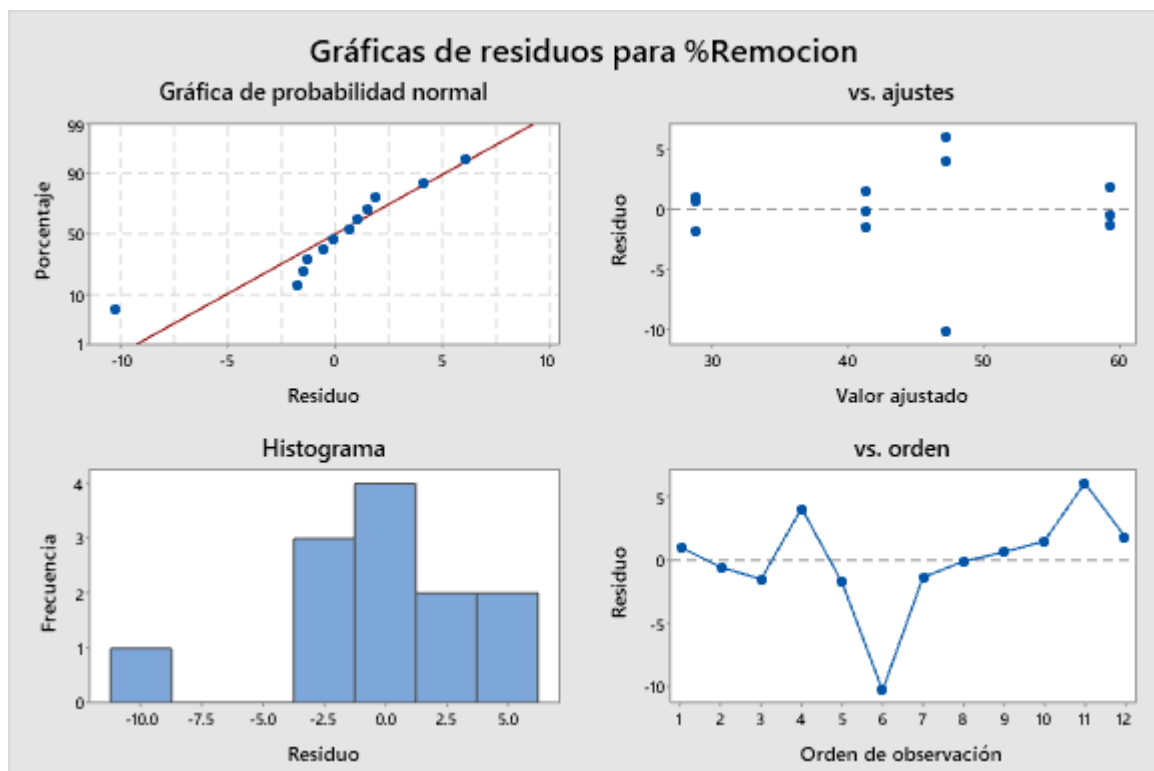
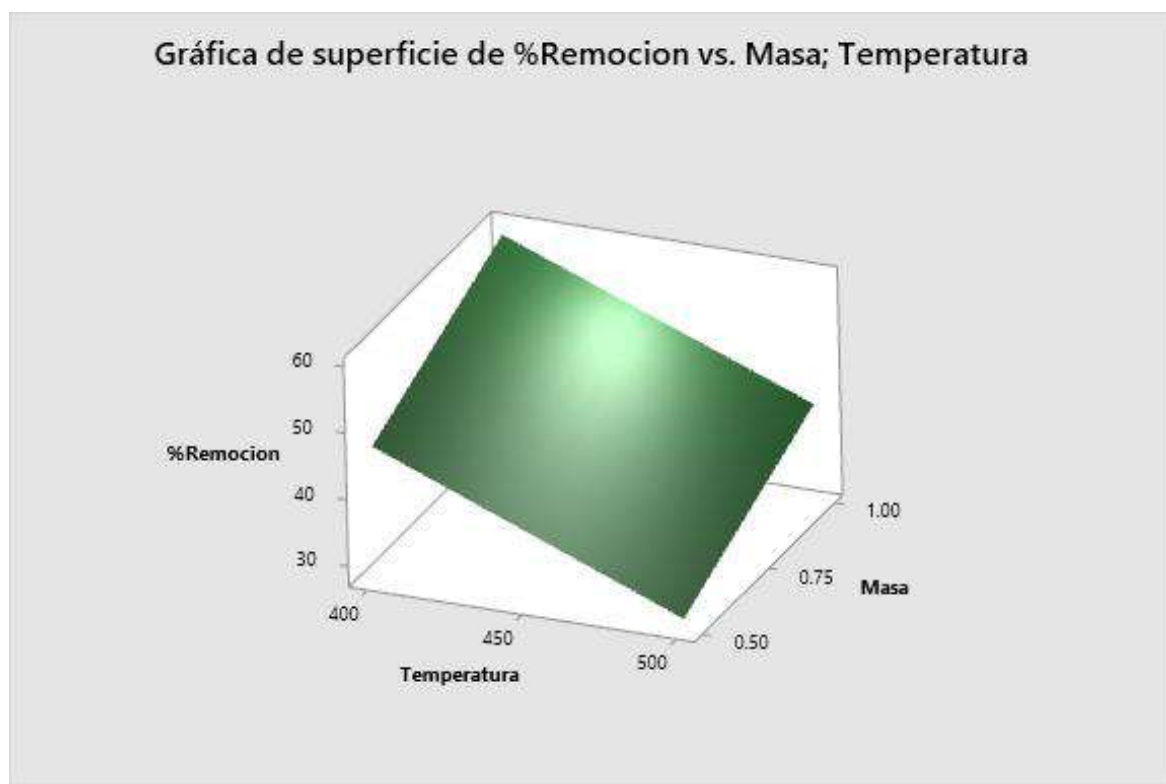


Figura 6

Grafica de Superficies para el Diseño Experimental



Capítulo V. Discusión de Resultados

5.1. Discusión de la Caracterización de la Materia Prima (Cáscara de Naranja)

5.1.1. *Discusión de la Acidez Volátil*

En esta investigación se encontró que la acidez volátil de la cáscara de naranja seca es de aproximadamente 0.41 gramos de ácido acético por cada 100 gramos de muestra. Este valor, junto con una baja desviación estándar (0.010), indica una composición relativamente estable. La presencia de esta acidez sugiere que hay grupos funcionales como los carboxilos, que son importantes porque ayudan a atraer y retener iones metálicos como el plomo. Estudios recientes, como el de Omolara y Musonge (2023), mencionan que este tipo de biomasa vegetal contiene componentes activos que pueden mejorar el proceso de adsorción. Además, Santos et al. (2022) indican que al aplicar un tratamiento térmico, se puede potenciar su capacidad para eliminar metales pesados del agua. Esto respalda que la cáscara de naranja puede ser un buen material para preparar bioadsorbentes y usarlos en la remoción de plomo de soluciones acuosas.

5.1.2. *Discusión del Porcentaje de Cenizas*

El análisis del contenido de cenizas en el bioadsorbente elaborado a partir de cáscara de naranja mostró un promedio de 7.73 %, lo cual indica que posee una proporción adecuada de compuestos minerales no volátiles. Este porcentaje se obtuvo luego de someter las muestras a calcinación hasta alcanzar peso constante, proceso que ayuda a evaluar la estabilidad térmica del material. Comparando estos datos con los hallazgos de Sahu et al. (2022), quienes obtuvieron un 8.1 % de cenizas en un adsorbente similar, se puede afirmar que los resultados son comparables y confirman que la cáscara de naranja presenta propiedades adecuadas para su uso en procesos de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados como el plomo.

5.1.3. *Discusión del Porcentaje de Humedad*

El análisis del porcentaje de humedad en cáscara de naranjas deshidratada a 100–105 °C registró pérdida de masa media del 13.93 %, que abarca un oportuno deshumedado de su contenido previo su empleo como bioadsorbente. Esta etapa es significativa ya que un contenido de humedad bajo permite estabilidad del material en el proceso de adsorción. Después de su esterilización por sequedad, se repletaron en un desecador como forma de suprimir su posible reabsorción de humedad y asegurar exactitud en su recopilación. Sobre los resultados obtenidos frente a estudios recientes similares como el de López-García et al. en 2022 en su muestra de cáscaras cítricas preparadas con propósito análogo en el que 14.1 % de contenido de humedad fue informado, se observa concordancia que justifica su proceso utilizado. Otros estudios como el de Zhang en 2023 destacan que una humedad inicial reducida preferentemente aumenta eficiencia en su remoción de plomo en porcentajes superiores del 60 %, coincidentes en su registro con los obtenidos en este trabajo y reafirma el potencial de su empleo como bioadsorbente en su aplicación en descontaminación de aguas de metales pesados.

5.2. Discusión de Resultados del Diseño Experimental: Factorial 2x2 con 3 Réplicas

5.2.1. *Discusión de la Síntesis del Diseño experimental.*

El modelo factorial 2x2 con tres réplicas, diseñado para estudiar la remoción de plomo mediante un bioadsorbente elaborado a partir de cáscara de naranja, permitió evaluar el efecto de la masa utilizada en el tratamiento y de dos condiciones de calcinación distintas aplicadas al bioadsorbente. Los resultados obtenidos mediante Minitab muestran un error estándar de 4.67369, lo que indica una variación moderada en los datos residuales. Además, el modelo explicó el 89.30 % de la variabilidad total (R^2), mientras que el R^2 ajustado fue de 85.29 %, confirmando un ajuste sólido al considerar los factores

involucrados. El R^2 predicho, con un valor del 75.93 %, refleja una buena capacidad del modelo para anticipar resultados en nuevas condiciones experimentales, lo cual valida la eficiencia del diseño en el análisis de los parámetros que influyen en la capacidad de adsorción del bioadsorbente.

5.2.2. *Discusión del Análisis de Varianza (ANOVA) del Diseño Experimental*

El modelo factorial 2x2 con tres réplicas, aplicado para estudiar la remoción de plomo con bioadsorbente de cáscara de naranja, presentó resultados estadísticamente significativos. El análisis de varianza indicó que el modelo general es altamente significativo ($p = 0.000$), lo que refleja su eficacia para explicar la variabilidad en los datos. De los factores evaluados, la temperatura de calcinación mostró el mayor impacto sobre la eficiencia del proceso ($p = 0.000$), seguida por la masa del bioadsorbente ($p = 0.002$), confirmando que ambos influyen de forma individual en la capacidad de adsorción. Sin embargo, la interacción entre temperatura y masa no fue significativa ($p = 0.933$), lo que indica que sus efectos no se combinan de forma relevante en el sistema. En conjunto, estos resultados validan la robustez del modelo y permiten identificar las condiciones más efectivas para el uso del bioadsorbente en el tratamiento de aguas contaminadas.

5.2.3. *Discusión de la Ecuación de Regresión y el Gráfico de Superficies*

La Figura 9 muestra cómo varía el porcentaje de remoción de plomo en función de la masa del bioadsorbente de cáscara de naranja y la temperatura de calcinación. Se aprecia que, a mayor masa, la eficiencia de remoción aumenta, mientras que un incremento en la temperatura tiende a reducir levemente dicha eficiencia. Esta relación se describe en la ecuación de regresión obtenida del modelo experimental: $\%R = 111.2 + 20.4 \times m - 0.1900 \times T + 0.009 \times m \times T$, donde $\%R$ es el porcentaje de remoción, m la masa del bioadsorbente (g) y T la temperatura de calcinación ($^{\circ}\text{C}$). La ecuación resalta el efecto positivo de la masa sobre la adsorción, mientras que la temperatura tiene un impacto

negativo moderado y la interacción entre ambas variables resulta poco significativa. Estos resultados coinciden con lo reportado por Zhang et al. (2023), quienes observaron una mayor eficiencia de remoción con masas más elevadas de adsorbente, y también con el trabajo de López-García et al. (2022), que indicó que temperaturas excesivamente altas pueden afectar negativamente la porosidad del material, disminuyendo su capacidad de adsorción. En conjunto, el modelo propuesto respalda el uso eficiente del bioadsorbente a condiciones controladas, alineándose con hallazgos previos en la literatura científica.

5.2.4. *Discusión del Gráfico de Efectos Estandarizados y Residuos*

El diagrama de Pareto con efectos estandarizados indica que la variable más influyente en la remoción de plomo es la temperatura de calcinación, seguida por la masa del bioadsorbente, mientras que la interacción entre ambas no tiene un efecto significativo, lo que sugiere que cada factor actúa de manera independiente. Las gráficas de residuos confirman que el modelo es estadísticamente válido, ya que los residuos se distribuyen de forma cercana a la normalidad, sin patrones definidos respecto a los valores ajustados ni al orden de observación. Además, la dispersión homogénea y centrada alrededor de cero en los residuos respalda la confiabilidad del modelo y la consistencia del experimento.

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

La caracterización de la cáscara de naranja evidencia que posee propiedades adecuadas para ser utilizada como bioadsorbente en la remoción de plomo en soluciones acuosas. Su bajo nivel de humedad (13.93 %) contribuye a la estabilidad del material durante el proceso de adsorción, mientras que el valor de acidez volátil (0.41 g de ácido acético por 100 g de muestra) indica la presencia de grupos funcionales activos, como los carboxilos, que facilitan la fijación de metales pesados. Por otro lado, el contenido de cenizas (7.73 %) revela una cantidad apropiada de compuestos minerales no volátiles, lo que refleja buena estabilidad térmica. Estos parámetros en conjunto refuerzan la viabilidad del uso de cáscara de naranja como un bioadsorbente eficaz, accesible y ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas contaminadas.

El análisis del diseño factorial permitió comprender cómo la masa del bioadsorbente y la temperatura de calcinación afectan la remoción de plomo usando cáscara de naranja como material base. Se evidenció que un mayor contenido de masa incrementa la eficiencia del proceso, mientras que temperaturas elevadas provocan una disminución en la capacidad de adsorción. Esta pérdida de eficiencia a altas temperaturas se debe, probablemente, a la degradación térmica de grupos funcionales esenciales para la fijación de metales, como los carboxilos. Este comportamiento es consistente con lo informado por López-García et al. (2022), quienes observaron una reducción en la porosidad y funcionalidad del material calcinado a temperaturas demasiado altas. De igual forma, Zhang et al. (2023) destacaron que condiciones térmicas moderadas permiten conservar mejor las propiedades adsorbentes. Por tanto, el presente estudio refuerza la importancia de optimizar la temperatura de activación térmica para conservar las

propiedades superficiales del bioadsorbente y maximizar su rendimiento en la remoción de plomo en aguas contaminadas.

6.2.Recomendaciones

Regular la temperatura de calcinación es fundamental evitar temperaturas excesivamente altas durante el tratamiento térmico del bioadsorbente, ya que pueden deteriorar los grupos funcionales responsables de la adsorción de plomo. Se recomienda mantener una temperatura moderada que permita conservar la estructura y funcionalidad del material.

Determinar adecuadamente la cantidad de bioadsorbente mejora notablemente la remoción de plomo. Por ello, es conveniente utilizar cantidades suficientes que aseguren una mayor disponibilidad de sitios activos sin generar un uso innecesario de material.

Asegurar un bajo contenido de humedad de la cáscara de naranja antes de su uso, procurando que el porcentaje de humedad sea reducido, ya que esto contribuye a la estabilidad del bioadsorbente durante el proceso y evita que el agua interfiera en la adsorción de metales.

Utilizar la acidez volátil como parámetro indicativo ya que refleja la presencia de grupos funcionales útiles para la adsorción. Por lo tanto, su medición puede ser una herramienta valiosa para evaluar la capacidad del material, considerando que valores como el obtenido en este estudio (0.41 g/100 g) indican una composición adecuada.

Fomentar el uso de residuos orgánicos en el tratamiento de aguas como una opción económica, accesible y sustentable para remover metales pesados, por lo que se sugiere promover su aplicación en entornos que generen este tipo de desechos.

Referencias

- Aguilar, R. (2002). *Obtención de fibra dietaria a partir de residuos vegetales*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- ASTM. (1976). *Standard Test Method for Particle Size of Activated Carbon*. ASTM International.
- Auer, M., Rodríguez, P., & Salgado, L. (1998). *Uso del carbón activado en el tratamiento de aguas*. Universidad Central de Venezuela.
- Bello, M., Rodríguez, R., & Pérez, L. (2021). *Evaluación de bioadsorbentes naturales para la remoción de metales*. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 28(2), 45–53.
- Boulaajaj, A., El Moudden, O., & Hachkar, M. (2022). Utilización de cáscara de naranja seca como biosorbente para la eliminación de plomo en soluciones acuosas. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102304.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102304>
- Cerón, A. (2011). *Aprovechamiento de residuos cítricos en la agroindustria*. Universidad Nacional de Colombia.
- Concheso, A., Díaz, L., & González, L. (2006). *Aplicaciones industriales del carbón activado*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cunha, A., Barros, J., & Silva, M. (2020). Factores climáticos en la producción de cítricos. *Agricultura Tropical*, 50(1), 39–49.

Delgadillo, J. A. (2011). *Caracterización y activación de carbones a partir de residuos lignocelulósicos*. Universidad de Antioquia.

Devia, L. (2002). *Obtención de pectina cítrica mediante extracción química*. Universidad del Valle.

Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México. (s.f.). *Normas técnicas para especificación de carbón activado granular*.

Drabrowski, A., Hubicki, Z., Podkościelny, P., & Robens, E. (2005). Selective adsorption of heavy metal ions on activated carbons. *Chemosphere*, 58(8), 1049–1070.

El-Naggar, A., Chen, Z., & Tsang, D. (2021). Agricultural waste-derived biosorbents for water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104509.

Espachs, A. (2004). *Caracterización físico-química de la cáscara de naranja*. Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

FAO. (2021). *Agroclimatic requirements of citrus*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022). *FAOSTAT database*. <https://www.fao.org/faostat>

Fombuena, V. (2009). *Aplicación de biocompuestos para tratamiento de aguas residuales*. Universidad Politécnica de Valencia.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.

García-Luengo, A., Ruiz, A., & Soto, L. (2019). Adaptabilidad de los cítricos a diferentes tipos de suelo. *Revista Hortofrutícola*, 35(2), 29–36.

Gil, A., Gómez, F., & Castaño, J. (2008). Producción de ácido láctico a partir de residuos cítricos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 10(1), 44–52.

González, C. (2004). *Caracterización de carbones activados a partir de residuos vegetales*. Pontificia Universidad Javeriana.

Hawkins, R. (2012). *Structural and chemical composition of citrus peels*. Food Chemistry Reports, 18(4), 276–285.

Huamán Quispe, A. (2020). *Evaluación de residuos agroindustriales como adsorbentes de plomo en aguas residuales mineras* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72.

León, R. (2015). *Extracción de aceites esenciales de la cáscara de naranja mediante hidrodestilación*. Universidad Nacional de Colombia.

López-Luna, J., López-Cervantes, J., & Torrestiana-Sánchez, B. (2019). Biosorption of heavy metals by natural and modified biomass: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1), 23.

López, C., Morales, G., & Sánchez, P. (2014). Impacto fitotóxico de compost de cítricos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 48(2), 115–122.

Marsh, H. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier Science.

Martínez, M. L. (2012). *Propiedades y usos del carbón activado*. Editorial Reverté.

Menéndez, J. A. (2006). *Porosidad y estructura del carbón activado*. Revista Española de Materiales, 39(2), 69–79.

Menéndez, J. A. (2008). *Avances en el desarrollo de estructuras conformadas de carbón activado*. Revista Cubana de Química, 20(1), 21–27.

MINAM. (2017). *Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua*. Ministerio del Ambiente del Perú.

Molina, A., & García, C. (2004). Producción de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos. *Ingeniería e Investigación*, 24(2), 46–52.

Moreno, M., Rodríguez, R., & Alvarado, D. (2000). Uso de la cáscara de naranja para alimentación animal. *Zootecnia Tropical*, 18(3), 205–210.

Moreno, P., López, L., & Díaz, M. (2006). Carotenoides en residuos cítricos. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología*, 11(1), 15–20.

Moreno-Piraján, J. C., & Giraldo, L. (2023). *Preparación y caracterización de bioadsorbentes lignocelulósicos*. Revista de Ciencia e Ingeniería, 45(1), 88–99.

Palacios, O. (2005). *Morfología, cultivo y aprovechamiento de los cítricos*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Padrón, J., Ortega, D., & Núñez, G. (1999). Producción de pigmentos naturales a partir de residuos cítricos. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 9(1), 47–52.

Pinzón, M., Ríos, A., & Castillo, H. (s.f.). *Evaluación fisicoquímica de cáscaras de naranja como precursor para bioadsorbentes*. Universidad Nacional de Colombia.

Ramírez Cárdenas, S. (2023). *Diseño de un biofiltro a base de cáscara de naranja para remover plomo en agua* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Rey, A., Faraldos, M., Casas, J. A., & Zazo, J. A. (2009). Aplicación del carbón activado en procesos de oxidación avanzada. *Revista de Ingeniería Química*, 45(3), 67–75.

Robalino-López, A., Garrido-Castillo, C., & Cabrera-Andrade, A. (2021). Potencial de los biosorbentes naturales en la eliminación de contaminantes metálicos. *Revista Ambiente & Agua*, 16(1), e2513.

Roopa, S. (2016). Industrial applications of activated carbon: A review. *Journal of Environmental Management*, 12(4), 123–129.

Santos, F., Almeida, G., & Silva, P. (2022). Limpieza y secado de biomasa vegetal para adsorción. *Ingeniería Ambiental*, 34(2), 55–60.

Sheintuch, M., Green, M., & Tarre, S. (1999). Activated carbon treatment and regeneration strategies. *Water Research*, 33(9), 2049–2056.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164.

Torné, M. (2006). *Procesos de adsorción en el tratamiento de aguas*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Volesky, B. (2007). *Biosorption of Heavy Metals* (2nd ed.). CRC Press.

Wan, N. (2004). Evaluación de la lignina en la producción de adsorbentes. *BioResources*, 1(3), 263–276.

Anexos

Anexo 1

Proceso de Secado para la Materia Prima



Anexo 2

Proceso de Trituración y Tamizado.





Anexo 3

Calcinación de la Cáscara de Naranja en Polvo.





Anexo 4

Activación Química del Bioadsorbente





Anexo 5

Lavado, Filtrado y Secado del Bioadsorbente.



Anexo 6

Preparación de la Solución Estándar de Plomo.

Para emplear iones plomo (Pb^{2+}) en los ensayos de adsorción, se preparó una solución estándar de nitrato de plomo(II) $[\text{Pb}(\text{NO}_3)_2]$ con una concentración de 0.01 molar. Dado que la masa molar del compuesto es 331.2 g/mol, la cantidad requerida para preparar un litro de solución fue de 3.31 gramos, calculada mediante la relación:

$$\text{Molaridad} \times \text{Masa Molar} = 0.01 \frac{\text{mol}}{\text{litro}} \times 331.2 \frac{\text{gramos}}{\text{mol}} = 3.31 \frac{\text{gramos}}{\text{litros}}$$

Se pesaron 3.31 g de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ utilizando una balanza analítica.

El reactivo se disolvió cuidadosamente en aproximadamente 100 mL de agua destilada, mezclando hasta su completa disolución.

Posteriormente, la solución se vertió en un matraz aforado de 1 litro y se completó el volumen hasta la señal con agua destilada, obteniendo así la concentración deseada de 0.01 M.



Anexo 7

Preparación de la Solución EDTA.

Para preparar una solución molar de EDTA disódico dihidratado ($\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con concentración 0.01 M, se tomó como referencia su masa molar de 372.24 g/mol, lo que permite calcular que se requieren 3.72 gramos del compuesto para un litro de solución.

Pasos de preparación:

Se pesaron cuidadosamente 3.72 g del reactivo utilizando una balanza analítica.

El material se disolvió en una cantidad adecuada de agua destilada, mezclando hasta lograr una disolución completa.

Posteriormente, la solución fue vertida en un matraz aforado de 1 L, completando el volumen hasta la marca con agua destilada.

Finalmente, se almacenó la solución en un recipiente bien cerrado, asegurando condiciones adecuadas para su conservación.



Anexo 8

Preparación del Indicador Xilenol Naranja.

Para la preparación de una solución indicadora de xilenol naranja al 0.1 %, se deben seguir los siguientes pasos: (1) pesar 0.1 gramos de xilenol naranja utilizando una balanza analítica; (2) disolver completamente el reactivo en 100 mL de agua destilada o en

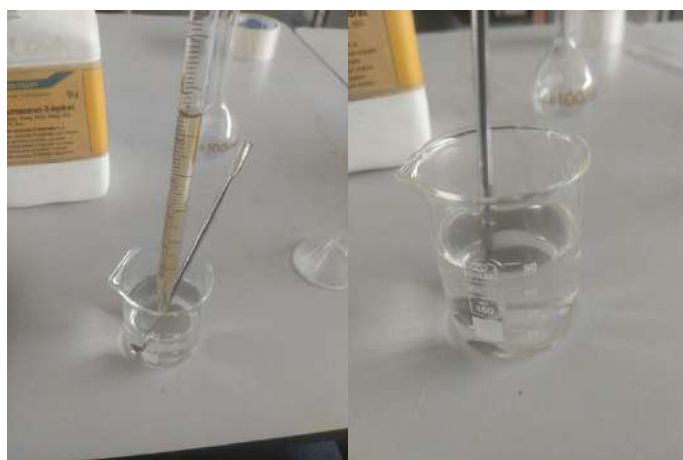
una mezcla de etanol y agua en proporción 1:1, según se requiera; (3) una vez disuelta la sustancia, filtrar y transferir la solución a un frasco de vidrio oscuro o ámbar con tapa hermética; y (4) almacenar en un lugar fresco y protegido de la luz para conservar su estabilidad.



Anexo 9

Preparación del Sistema Tampón Ácido Acético-Acetato de Sodio.

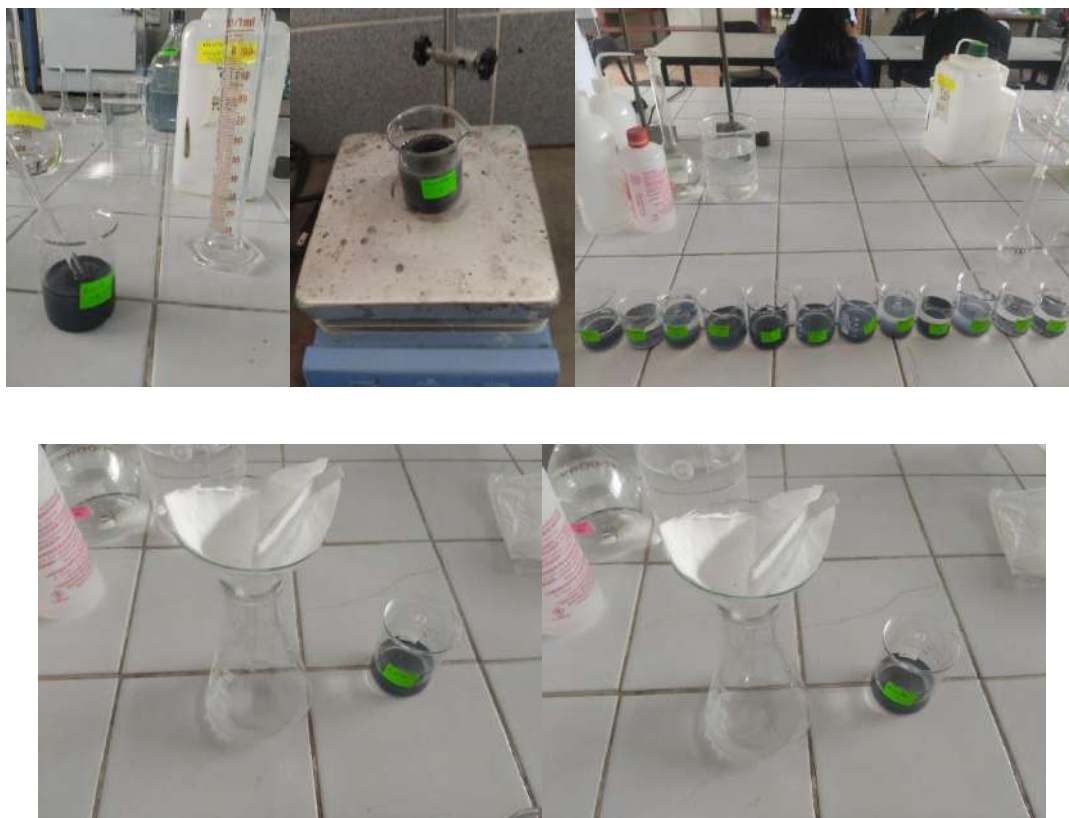
Para preparar una solución buffer ácida con pH 5.3 utilizando ácido acético y acetato de sodio, se deben seguir los siguientes pasos: (1) medir 5.75 mL de ácido acético glacial; (2) pesar 0.82 gramos de acetato de sodio anhidro, o 1.36 gramos si se utiliza la forma trihidratada; (3) disolver ambos componentes en una cantidad moderada de agua destilada, asegurando una mezcla homogénea; y (4) transferir la solución a un matraz aforado y completar el volumen final a 100 mL con agua destilada. Esta solución actúa como buffer ácido, estabilizando el pH en torno a 5.3, y es comúnmente utilizada en sistemas donde se requiere mantener un ambiente ligeramente ácido.



Anexo 10

Preparación de las Muestras.

Para llevar a cabo el tratamiento de la solución con carbón activado antes del análisis por titulación, se siguen los siguientes pasos: (1) medir 50 mL de la solución de Pb^{2+} 0.01 M y verterla en un vaso de precipitados limpio; (2) añadir una cantidad conocida de carbón activado al vaso; (3) colocar el recipiente en un agitador magnético o orbital; (4) agitar la mezcla durante un periodo de 30 a 60 minutos para favorecer el contacto entre el adsorbente y los iones metálicos; (5) al finalizar el tiempo de agitación, dejar reposar 24 horas y filtrar la mezcla utilizando papel de filtro para separar el carbón activado; y (6) recolectar la solución filtrada, la cual corresponde a la muestra tratada que se empleará en el análisis posterior mediante titulación con EDTA.



Anexo 11

Titulación de las Muestras.

El proceso de titulación para las muestras, ya sean tratadas o sin tratar, se lleva a cabo siguiendo estos pasos: (1) tomar una alícuota conocida de la muestra, 50.00 mL, y colocarla en un matraz o vaso de precipitados limpio; (2) añadir 5 mL de solución buffer para estabilizar el medio durante la titulación; (3) incorporar de 2 a 3 gotas de indicador xilenol naranja, el cual permitirá visualizar el punto final de la reacción; (4) proceder con la titulación utilizando una solución de EDTA 0.01 M, agregándola lentamente mientras se agita suavemente; (5) observar el cambio de color de rojo violáceo a amarillo claro, lo cual indica que se ha alcanzado el punto final; y (6) registrar cuidadosamente el volumen de EDTA utilizado para cada muestra. Este procedimiento permite cuantificar la concentración de iones metálicos presentes mediante una titulación complejométrica precisa.

