



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias Químicas

**Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Rio Valles)**

Tesis para obtener el grado de:

Doctorado en Ciencias Químicas

Presenta:

**MONTES ROCHA JOSE ANGEL**

Comité tutelar:

Directora de tesis: Dra. Candy Carranza Álvarez

Codirector de tesis: Dr. Ángel Josabad Alonso Castro



## **UASLP-Sistema de Bibliotecas**

### **Repositorio Institucional Tesis Digitales Restricciones de Uso DERECHOS RESERVADOS**

#### **PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Río Valles) © 2024 by Montes Rocha Jose Angel is licensed under [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

La parte experimental del proyecto de Doctorado en Ciencias Químicas se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, durante el periodo de agosto de 2020 a agosto de 2024. Fue desarrollado bajo la dirección de la Dra. Candy Carranza Álvarez, con la codirección del Dr. Ángel Josabad Alonso Castro y la asesoría del Dr. César Arturo Ilizaliturri Hernández.

El Doctorado en Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí forma parte del Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) del CONAHCYT, con registro 00520. Se recibió apoyo de beca CONAHCYT con número 374030, vinculada al CVU 589992.

Los datos generados en el trabajo titulado "Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Río Valles)" están bajo resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
Facultad de Ciencias Químicas  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado  
Posgrado en Ciencias Químicas  
Programa de Doctorado

Formato D15

## Solicitud de Registro de Tesis Doctorado

San Luis Potosí S.L.P., a Diciembre/ 16 /2024

**Comité Académico del PCQ  
FCQ de la UASLP  
Presente**

**En atención a: Coordinador del Posgrado**

Por este conducto solicito a Usted se lleve a cabo el registro de título de tesis de Doctorado, el cual quedo definido de la siguiente manera: Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Rio Valles).

que desarrollará el estudiante: José Ángel Montes Rocha

bajo la dirección y/o Co -dirección de: Dra. Candy Carranza Álvarez y el Dr. Ángel Josabad Alonso Castro

Asimismo, le comunico que el proyecto en el cual trabajará el alumno involucrará el manejo de animales de experimentación, estudios con seres humanos o muestras derivadas de los mismos, el manejo y/o generación de organismos genéticamente modificados y requiere de aval de Comité de Ética e investigación de la FCQ.

(Complete la opción que aplique en su caso):

( ) Sí debido a que: \_\_\_\_\_

( ) No

(x) No Aplica

Sin otro particular, quedo de Usted.

**A T E N T A M E N T E**

José Angel Montes Rocha

Nombre y firma del estudiante

Dra. Candy Carranza Álvarez

Directora de Tesis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias Químicas

**Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Rio Valles)**

Tesis para obtener el grado de:  
Doctorado en Ciencias Químicas

Presenta:

**MONTES ROCHA JOSE ANGEL**

**SINODALES:**

Presidente: Dra. Gabriela Navarro Tovar \_\_\_\_\_  
Secretario: Dra. Candy Carranza Álvarez \_\_\_\_\_  
Vocal: Dr. Ángel Josabad Alonso Castro \_\_\_\_\_  
Vocal: Dr. César Arturo Ilizaliturri Hernández \_\_\_\_\_  
Vocal: Dr. Nahúm Andrés Medellín Castillo \_\_\_\_\_  
Vocal: Dr. Alejandro Hernández Morales \_\_\_\_\_

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

Enero, 2025

## **INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO**

Dra. Candy Carranza Álvarez, Directora de tesis. Profesora Investigadora de Tiempo Completo de la FEPZH de la UASLP, miembro del núcleo académico básico del Posgrado en Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Ángel Josabad Alonso Castro, Codirector de tesis. Adscrito al Departamento de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Guanajuato.

Dr. César Arturo Ilizaliturri Hernández, Asesor de tesis. Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Facultad de Medicina de la UASLP.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
Facultad de Ciencias Químicas  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado  
Posgrado en Ciencias Químicas  
Programa de Doctorado

Formato D5

## Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí, S.L.P., a Diciembre/ 16 /2024

En la ciudad de San Luis Potosí el día 16 del mes de diciembre del año 2024. El que suscribe José Ángel Montes Rocha, alumno del programa de posgrado en Ciencias Químicas adscrito a Universidad Autónoma de San Luis Potosí manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dra. Candy Carranza Álvarez y el Dr. Ángel Josabad Alonso Castro, y cede los derechos del trabajo titulado Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Rio Valles) a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo si el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección angel.montes@uaslp.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

José Ángel Montes Rocha

Nombre y firma del alumno



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**  
Facultad de Ciencias Químicas  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado  
Posgrado en Ciencias Químicas  
Programa de Doctorado

Formato D28

## **Carta de Análisis de Similitud**

San Luis Potosí SLP a 16 de  
diciembre del 2024

**L.B. María Zita Acosta Nava**  
**Biblioteca de Posgrado FCQ**

**Asunto:** Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada Parámetros fisicoquímicos y biológicos que participan en la fitoextracción de contaminantes por *Phragmites australis* en un efluente natural (Rio Valles) presentada por el autor M.C. José Angel Montes Rocha. La tesis es requisito para obtener el grado de Doctorado en el Posgrado en Ciencias Químicas. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 21% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envió un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**

Dr. Fidel Martínez Gutiérrez

Coordinador Académico del Posgrado  
en Ciencias Químicas

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Gracias por su apoyo incondicional, por motivarme a seguir superándome, por estar para mí cuando lo necesite, por su confianza y por creer en mí al realizar este proyecto y sobre todo por su amor y cariño. Los amo.

Roció, Abdú y Raphael

Dra. Candy Carranza Álvarez muchas gracias por su apoyo, paciencia y libertad en el uso del laboratorio al comenzar y concluir esta investigación. Gracias por su amistad y la de su esposo, el Dr. Juan José Maldonado Miranda.

Dr. Ángel Josabad Alonso Castro, le agradezco su apoyo y confianza, así como su apoyo académico y con infraestructura científica para el desarrollo del proyecto. Gracias por su amistad y la de su familia.

Dr. César gracias por confianza y por seguir apoyando cada idea que le propongo, le agradezco la libertad en el uso del laboratorio y su apoyo a lo largo de esta investigación. Le agradezco su amistad y la de su familia.

Dra. Candy, Dr. Ángel y Dr. César les agradezco el tiempo invertido durante las revisiones de la tesis y de los manuscritos realizados durante estos cuatro años.

Agradezco al personal del Laboratorio de Investigación en Ciencias Ambientales de la FEPZH de la UASLP, con los cuales conviví durante los cuatro años. Gracias por su apoyo durante el desarrollo de este proyecto y por su amistad. M.C. Claudia Esthela Moctezuma Granados, BQ. Juan Gilberto Ceballos Maldonado, BQ. Javier Gómez Rubio y M.C. Carol Fabina Ríos Martínez. Gracias por su apoyo.

A los estudiantes de la Lic. en Bioquímica Franco y Marianel, gracias por apoyarme durante el desarrollo experimental en cada una de las etapas de este proyecto.

## RESUMEN

La contaminación de los ríos por elementos potencialmente tóxicos (EPT) representa una preocupación global significativa, y el río Valles, principal fuente de agua potable para Ciudad Valles, ha sido objeto de atención debido a los intereses políticos, económicos y sociales vinculados a las principales actividades productivas de la región. A lo largo de las cuatro estaciones del año, se tomaron muestras de agua (n=6), sedimentos (n=6) y de las plantas *Phragmites australis* (n=10). Se analizaron los EPT en las tres matrices (agua, sedimentos y plantas), y se determinó las propiedades fisicoquímicas del agua y los sedimentos. En una segunda fase, se realizó un experimento semi-controlado de 10 días en el que se probaron tres tratamientos: plantas de *P. australis* expuestas a agua desionizada (AD), plantas de *P. australis* expuestas a agua desionizada con  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  y (ADM), y plantas de *P. australis* expuestas a agua de río con  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  y (ANM). Durante el experimento, se midieron diversos parámetros, incluyendo pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), concentración de plomo en agua, tejidos aéreos y subterráneos de las plantas, contenido de clorofila (Chl) y actividades enzimáticas de superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT). Los resultados mostraron que el agua contenía EPT como As, Pb, Cd y se encontró Hg en algunas muestras. Se registraron variaciones en el pH (6.92-7.84) y altas concentraciones de sulfatos (13.95-30.72 mg/L), cloruros (3.22-28.79 mg/L) y sólidos disueltos totales (0.04-0.10 µg/L). Los sedimentos presentaron concentraciones elevadas de metales pesados (Ni, Hg, Cu, Zn, Pb, V), con pH entre 6.5-7.3, y niveles significativos de sulfatos (7.6-26.1 mmol/L) y cloruros (1.2-18.0 mmol/L). *P. australis* acumuló metales pesados, especialmente en las raíces, durante todas las estaciones del año, con concentraciones destacadas de Mn (19.6-576.6 mg/kg), Ni (1.4-4.9 mg/kg), Cu (3.4-14.7 mg/kg), Zn (11.6-74.1 mg/kg) y Pb (0.4-1.1 mg/kg). En el experimento semi-controlado, se observó una reducción en la concentración de Pb en el tratamiento ADM (175.8-69.6 mg/kg), con correlaciones significativas con el pH (-0.801), Pb en tejido aéreo (0.426) y actividad de SOD en tejido aéreo (0.447). En el tratamiento ANM, se observó una disminución en la concentración de Pb (83.95-16.95 mg/kg), correlacionada con el Pb en los tejidos subterráneos (0.915). La presencia de EPT en agua, sedimento y plantas parece estar relacionada principalmente con la actividad de la industria azucarera, las aguas residuales urbanas e industriales, la combustión de combustibles fósiles y las prácticas agrícolas. Debido a su capacidad para acumular diversos metales pesados (Mn, Rb, V, Sr, Cu, Zn, Pb, Ni, As) en sus raíces, *P. australis* representa una especie vegetal adecuada para llevar a cabo la fitorremediación *in situ* de contaminantes en ecosistemas acuáticos.

Palabra clave: Elementos Potencialmente Tóxicos, contaminación del agua, fitorremediación, *Phragmites australis*.

## ABSTRACT

River contamination by potentially toxic elements (PTEs) represents a significant global concern, and the Valles River, the primary source of drinking water for Ciudad Valles, has attracted attention due to political, economic, and social interests linked to the region's main productive activities. Throughout the four seasons of the year, water (n=6), sediment (n=6), and *Phragmites australis* plant (n=10) samples were collected. PTEs were analyzed in all three matrices (water, sediment, and plants), along with the physicochemical properties of water and sediment. In the second phase, a 10-day semi-controlled experiment was conducted, testing three treatments: deionized water with *P. australis* (AD), deionized water with Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and *P. australis* (ADM), and river water with Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and *P. australis* (ANM). During the experiment, various parameters were measured, including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), lead concentration in water, aerial and underground plant tissues, chlorophyll (Chl) content, and enzymatic activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT). The results showed that water contained PTEs such as As, Pb, Cd, and, in some samples, Hg. Variations in pH (6.92–7.84) were recorded, along with high concentrations of sulfates (13.95–30.72 mg/L), chlorides (3.22–28.79 mg/L), and total dissolved solids (0.04–0.10 µg/L). The sediments exhibited elevated concentrations of heavy metals (Ni, Hg, Cu, Zn, Pb, and V), with pH values ranging from 6.5 to 7.3 and significant levels of sulfates (7.6–26.1 mmol/L) and chlorides (1.2–18.0 mmol/L). *P. australis* accumulated heavy metals, particularly in its roots, across all seasons, with notable concentrations of Mn (19.6–576.6 mg/kg), Ni (1.4–4.9 mg/kg), Cu (3.4–14.7 mg/kg), Zn (11.6–74.1 mg/kg), and Pb (0.4–1.1 mg/kg). In the semi-controlled experiment, a reduction in Pb concentration was observed in the ADM treatment (175.8–69.6 mg/kg), with significant correlations to pH (-0.801), Pb in aerial tissue (0.426), and SOD activity in aerial tissue (0.447). In the ANM treatment, a decrease in Pb concentration (83.95–16.95 mg/kg) was noted, correlated with Pb levels in underground tissues (0.915). The presence of PTEs in water, sediment, and plants appears to be primarily related to the sugar industry, urban and industrial wastewater, fossil fuel combustion, and agricultural practices. Due to its ability to accumulate a variety of heavy metals (Mn, Rb, V, Sr, Cu, Zn, Pb, Ni, As) in its roots, *P. australis* is a suitable plant species for conducting in situ phytoremediation of contaminants in aquatic ecosystems.

Keyword: Potentially Toxic Elements, water pollution, phytoremediation, *Phragmites australis*.

## Contenido

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	4
2.1. Importancia del agua	4
2.2. Disponibilidad del agua	4
2.4 Situación actual de agua en México	7
2.5 Ecosistemas acuáticos de la Huasteca Potosina	7
2.6 Calidad del agua	10
2.7 Contaminación del agua	10
2.7.1 Contaminación del agua por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	11
2.7.1.1 Plomo	12
2.7.1.2 Cromo	12
2.7.1.3 Cobalto	13
2.7.1.4 Arsénico	13
2.7.1.5 Níquel	14
2.7.1.6 Mercurio	14
2.7.1.7 Zinc	15
2.7.1.8 Cadmio	15
2.7.2 Contaminación de sedimento por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	16
2.7.3 Los principales factores que pueden influir en la disponibilidad y toxicidad de los EPT	16
2.7.4 Estrés inducido por metales pesados	18
2.8 Macrófitas acuáticas	19
2.9 Phragmites australis	20
2.10 Mecanismos de la fitorremediación	25
2.11 Mecanismos de absorción de metales pesados	27
2.11.1 Absorción foliar	27
2.11.2 Absorción radicular	28
2.12 Mecanismos de tolerancia de las plantas a contaminantes	29

2.12.1 Exudados raíz	30
2.12.2 Pared celular	31
2.12.3 Membrana plasmática	35
2.12.4 Vacuola	36
2.12.5 Xilema	38
2.12.6 Floema	38
2.12.7 Quelación de metales en el citosol por diversos ligandos	39
CAPITULO 3. OBJETIVOS	45
3.1. Planteamiento del problema	45
3.2. Justificación	46
3.3. Hipótesis	47
3.4. Objetivo general	48
3.5. Objetivos específicos	48
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	48
4.1. Área de estudio	48
4.2. Muestreo	49
4.3. Ensayos en un ambiente natural	50
4.3.1. Determinaciones en agua	50
4.3.2. Determinaciones en sedimento y planta	53
4.4. Ensayo semicontrolado para la remoción de metales pesados por <i>Phragmites australis</i>	57
4.4.1. Colecta de muestras de aguas superficiales y plantas	57
4.4.2. Ensayo semicontrolado	57
4.4.3. Determinación de las propiedades fisicoquímicas (PFQ)	57
4.4.4. Determinación de Pb en aguas superficiales y material vegetal	57
4.4.5. Determinación de clorofila (Chl), catalasa (CAT) y superóxido dismutasa (SOD)	58
4.5. Análisis estadístico	60
4.5.1. Análisis univariado	60
4.5.2. Análisis multivariado	61
5. RESULTADOS y DISCUSION	63

5.1.	Resultados del ensayo en un ambiente natural	63
5.1.1.	Análisis univariado por sitio en agua	63
5.1.2.	Análisis multivariado por sitio en agua	63
5.1.3.	Análisis univariado por estación en agua	63
5.1.4.	Análisis multivariado por estación en agua	64
5.1.5.	Análisis univariado en sedimento por sitio	65
5.1.6.	Análisis multivariado en sedimento por sitio	65
5.1.7.	Análisis univariado en sedimento por estación	66
5.1.8.	Análisis multivariado en sedimento por estación	66
5.1.9.	Índices de contaminación	67
5.1.10.	Análisis univariado en <i>Phragmites australis</i> por sitio	69
5.1.11.	Análisis multivariado en <i>Phragmites australis</i> por sitio	69
5.1.12.	Análisis univariado en <i>Phragmites australis</i> por estación del año	69
5.1.13.	Análisis multivariado en <i>Phragmites australis</i> por estación del año	70
5.1.14.	Análisis univariado en <i>Phragmites australis</i> por órgano	70
5.1.15.	Análisis multivariado en <i>Phragmites australis</i> por órgano	71
5.1.16.	Índices en planta	72
5.1.17.	Especiación química	73
5.2.	Discusión del ensayo en un ambiente natural	74
5.3.	Resultados del ensayo semi-controlado	83
5.3.1.	Exposición de <i>Phragmites australis</i> a $Pb(NO_3)_2$	83
5.3.2.	Propiedades fisicoquímicas	84
5.3.3.	Pb en agua	85
5.3.4.	Pb en tejido	86
5.3.5.	Clorofila	86
5.3.6.	CAT	87
5.3.7.	SOD	89
5.4.	Discusión del ensayo semi-controlado	91
6.	CONCLUSIÓN	95
7.	PERSPECTIVAS FUTURAS	97

8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
9.	Anexo 1 Publicaciones	118

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Estudios de metales pesados en el Río Valles.....	27
Cuadro 2. Estudios de metales pesados en Phragmites australis.....	41
Cuadro 3. Porcentaje acumulativo de propiedades fisicoquímicas y EPT en el agua mediante análisis SIMPER por sitio.....	77
Cuadro 4. Porcentaje acumulativo de propiedades fisicoquímicas y ETP en el agua mediante análisis SIMPER por estación del año.....	78
Cuadro 5. Porcentaje acumulativo de propiedades fisicoquímicas y EPT en sedimentos mediante análisis SIMPER por sitio.....	79
Cuadro 6. Porcentaje acumulativo de propiedades fisicoquímicas y ETP en sedimentos mediante análisis SIMPER por estación del año.....	80
Cuadro 7. Índice de geo-acumulación (Igeo) de EPT en sedimentos recolectados en tres sitios del Río Valles, Cd. Valles, S.L.P.....	81
Cuadro 8. Porcentaje acumulativo de EPT en planta mediante análisis SIMPER por sitio.....	82
Cuadro 9. Porcentaje acumulativo de EPT en planta mediante el análisis SIMPER por estación.....	83
Cuadro 10. Porcentaje acumulativo de EPT en la planta mediante análisis SIMPER por órgano.....	84

## Índice de figuras

Figura 1. Distribución del agua en el mundo. Consultado en: SEMARNAT, 2021.....	23
Figura 2 Morfología típica de <i>Phragmites australis</i> que muestra (a) panícula, (b) vaina foliar que contiene lígula con flecos, (c)limbo foliar, (d)espiguilla, (e) estoma y (f) rizomas horizontales y verticales con raíces (Packer et al., 2017).....	39
Figura 3. Mecanismos de Fitorremediación.....	44
Figura 4. Mecanismos de absorción foliar y radicular (Shahid et al., 2017; Tibbett et al., 2021; Pasricha et al., 2021).....	46
Figura 5. Implicación de los exudados radiculares en la tolerancia a los metales (Elaboración propia basada en información de Gupta & Singh, 2017; Yi-Tze et al., 2017).....	48
Figura 6. Componentes primarios de la pared implicados en la tolerancia a los metales (Elaboración propia basada en información de Anjitha et al., 2021; Meychik et al., 2021).....	50
Figura 7. Componentes secundarios de la pared implicados en la tolerancia a los metales (Elaboración propia basada en información de Anjitha et al., 2021; Meychik et al., 2021).....	51
Figura 8. Mecanismos de transporte de metales por la membrana plasmática (Elaboración propia basada en información de Pasricha et al., 2021; Tibbett et al., 2021; Yaashikaa et al., 2022).....	52
Figura 9. Mecanismos de transporte de metales a la vacuola (Elaboración propia basada en información de Shitan & Yazaki, 2019; Sharma et al., 2021).....	54
Figura 10. Mecanismo de transporte de metales en el xilema y el floema (Elaboración propia basada en información de Carrillo & Borthakur et al., 2021; Tibbett et al., 2021)....	55
Figura 11. Síntesis y composición del glutatión (Elaboración propia basada en información de Dobritzsch et al., 2019; Kaya et al., 2020; Kaya et al., 2020; Ivanov, 2021; Yadav et al., 2021).....	57
Figura 12. Síntesis de fitoquelatina (Elaboración propia basada en información de Carrillo y Borthakur, 2021; Khan et al., 2021; Yadav et al., 2021).....	58
Figura 13. Estructura de las metalotioneínas (Elaboración propia basada en información de Anjitha et al., 2021; Carrillo y Borthakur, 2021; Khan et al., 2021; Sharma et al., 2021b).....	59
Figura 14. Principales ácidos orgánicos involucrados en la quelación de metales (Hossain et al., 2012; Janeeshma et al., 2020; Anjitha et al., 2021).....	60
Figura 15. Localización de los sitios de muestreo de agua, sedimento y planta.....	65
Figura 16. Análisis canónico de coordenadas principales (CAP) de las propiedades fisicoquímicas y los elementos potencialmente tóxicos (ETP) del agua. El análisis muestra la variabilidad de los datos y las diferencias entre cada emplazamiento y estación. La dirección de los vectores indica el aumento de las propiedades fisicoquímicas y los PTE en los sitios. (a) CAP por emplazamiento y (b) CAP por estación.....	78
Figura 17. Análisis canónico de coordenadas principales (CAP) de las propiedades fisicoquímicas y las PTE en los sedimentos. El análisis mostró la variabilidad de los datos y las diferencias entre cada emplazamiento y estación. La dirección de los vectores indica el aumento de las propiedades fisicoquímicas y EPT en los sitios. (a) CAP por sitio y (b) CAP por estación.....	80
Figura 18. Los índices de EPT se presentan por sitios en el Río Valles. (a) Índice de carga contaminante (PLI). (b) Índice del Cociente de la Guía de Calidad del Suelo (SQGQI). El diagrama muestra la mediana y el rango intercuartílico.....	82
Figura 19. Análisis canónico de coordenadas principales (CAP) de las EPT en muestras de plantas. El análisis muestra la variabilidad de los datos, así como las diferencias entre	

factores (sitio, estación y órgano). La dirección de los vectores indica el aumento de EPT en plantas por sitio. (a) CAP por sitio, (b) CAP por estación y (c) CAP por órgano.....	85
Figura 20. Factor de bioconcentración en <i>Phragmites australis</i> por órgano. (R): raíz y rizoma, (SL): tallo y hoja.....	86
Figura 21. Factor de translocación en <i>Phragmites australis</i> por EPT.....	86
Figura 22. Morfología de <i>Phragmites australis</i> durante 10 días de exposición a $Pb(NO_3)_2$ : (a) tratamiento AD: planta con agua desionizada, (b) tratamiento ADM: planta con agua desionizada y 200 mg/kg de $Pb(NO_3)_2$ y (c) tratamiento ANM: planta con agua superficial del río Valles y 200 mg/kg de $Pb(NO_3)_2$ .....	95
Figura 23. Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas durante el período de 10 días en los tratamientos AD, ADM y ANM. (a) pH en solución, (b) CE en solución y (c) SDT en solución.....	96
Figura 24. Concentración de Pb en los tratamientos ADM y ANM. (a) Pb en agua y (b) Pb en tejido aéreo (AT) y subterráneo (ST) de <i>Phragmites australis</i> .....	97
Figura 25. Concentración de clorofila en el tejido aéreo de <i>Phragmites australis</i> en los tratamientos AD, ADM y ANM.....	98
Figura 26. Concentración de CAT en <i>Phragmites australis</i> en los tratamientos AD, ADM y ANM. (a) CAT en tejido aéreo (AT). (b) CAT en tejido subterráneo (ST). (c) Comparación de CAT en tejido aéreo (AT) con tejido subterráneo (ST).....	100
Figura 27. Concentración de SOD en <i>Phragmites australis</i> en los tratamientos AD, ADM y ANM. (a) SOD en tejido aéreo (AT). (b) SOD en tejido subterráneo (ST). (c) Comparación de tejido aéreo y subterráneo (ST).....	101

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya, E., & Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(1), 9-21.
- Ahmad, W., Alharthy, R. D., Zubair, M., Ahmed, M., Hameed, A., & Rafique, S. (2021). Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk. *Scientific Reports*, 11, 17006. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94616-4>
- Anjitha, K. S., Sameena, P. P., & Puthur, J. T. (2021). Functional aspects of plant secondary metabolites in metal stress tolerance and their importance in pharmacology. *Plant Stress*, 2, 100038. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100038>
- Baby, R., Saifullah, B., & Hussein, M. Z. (2019). Carbon Nanomaterials for the Treatment of Heavy Metal-Contaminated Water and Environmental Remediation. *Nanoscale Research Letters*, 14(341). <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3167-8>
- Chen, Y. T., Wang, Y., & Yeh, K. C. (2017). Role of root exudates in metal acquisition and tolerance. *Current Opinion in Plant Biology*, 39, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.06.004>
- Chrostowski, P. C., Durda, J. L., & Edelman, K. G. (1991). The use of natural processes for the control of chromium migration. *Remediation Journal*, 1(3), 341–351. <https://doi.org/10.1002/rem.3440010309>
- Cicero-Fernández, D., Peña-Fernández, M., Expósito-Camargo, J. A., & Antizar-Ladislao, B. (2017). Long-term (two annual cycles) phytoremediation of heavy metal-contaminated estuarine sediments by *Phragmites australis*. *New Biotechnology*, 38, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.07.011>
- Cortés Téllez, A. A., Sánchez-Fortún Rodríguez, S., Carmen, M., & Camacho, B. (2018). Mecanismos de resistencia a Metales tóxicos (Cd) bajo variaciones abióticas en Microalgas. *TIP Revista Especializada en Ciencias*, 21(1), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.08.005>
- Yaashikaa, P. R., Senthil-Kumar, P., Jeevanantham, S., & Saravanan, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution*, 301, 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119035>

- Yadav, S. K. (2010). Heavy Metals Toxicity in Plants: An Overview on the Role of Glutathione and Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants. *South African Journal of Botany*, 76(2), 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>
- Yan, X., An, J., Yin, Y., Gao, C., Wang, B., & Wei, S. (2022). Heavy metals uptake and translocation of typical wetland plants and their ecological effects on the coastal soil of a contaminated bay in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 803, 149871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149871>
- Zhang, C., Yu, Z., Zeng, G., Jiang, M., Yang, Z., Cui, F., & Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>
- Zhu, F., Zheng, Y. M., Zhang, B. G., & Dai, Y. R. A. (2021). A critical review on the electrospun nanofibrous membranes for the adsorption of heavy metals in water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123608. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123608>