

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE LA MINA PERALES
UBICADO EN LA ZONA HUACATA UTILIZANDO UN
BIOFILTRO CON PLANTA TOTORA**

Por:

JEZEBEL IBANIA WAYAR LLANOS

**Modalidad de graduación: Proyecto de Investigación Aplicada,
presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN
MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Química.**

Agosto de 2024

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A mi madre Nineth, por su amor incondicional, su apoyo constante y su ejemplo de esfuerzo y dedicación. Gracias por creer en mí y por brindarme todas las oportunidades para alcanzar mis sueños.

A mis abuelitos Bety y Enrique, por su amor y compañía, que, con su perseverancia y su ejemplo de trabajo duro, me han enseñado el valor de la dedicación y la disciplina

A mi hermana Joselyn, por su comprensión, su paciencia y su ánimo en los momentos difíciles.

ÍNDICE

Advertencia	
Agradecimiento	
Dedicatoria	
Pensamiento	
Resumen	

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
Justificación.....	6
Justificación Técnica.....	6
Justificación Económica.....	7
Justificación Social.....	7
Justificación Ambiental.....	8
Justificación Personal.....	8

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1 Marco Legal	9
1.1.1 Ley de Medio Ambiente (Ley 1333).....	9
1.1.1.1 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).....	9
1.1.1.2 Clasificación de los Cuerpos de Agua, su Aptitud y su Utilidad	9
1.1.2 Norma Boliviana NB-512 “Agua Potable”	10

1.1.3 Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM).....	10
1.1.4 Guías para la Calidad del Agua de Consumo OMS.....	10
1.2 Marco Conceptual.....	11
1.2.1 Contaminación de Aguas Superficiales por Metales Pesados.....	11
1.2.2 Metales pesados que contaminan las aguas superficiales	13
1.2.2.1. Plomo	13
1.2.2.2 Arsénico	14
1.2.2.3 Mercurio.....	15
1.2.2.4 Zinc	16
1.2.2.5 Cromo.....	16
1.2.2.6 Cadmio	17
1.2.2.7 Níquel.....	18
1.2.3 Fuentes de Contaminación de Aguas Superficiales por Metales Pesados	18
1.2.4 Contaminación de Aguas en Actividades Mineras	19
1.2.5 Efluentes Mineros	20
1.2.5.1 Fuentes de Efluentes Mineros	20
1.2.5.1.1 Drenaje Acido de Mina (DAM).....	21
1.2.5.1.2 Drenaje Acido de Roca (DAR)	21
1.2.6 Métodos de Tratamiento de Metales Pesados	22
1.2.6.1 Técnicas Convencionales	23
1.2.6.1.1 Filtración por Membrana.....	23
1.2.6.1.2 Intercambio Iónico	23
1.2.6.1.3 Adsorción (Convencional)	23

1.2.6.1.4 Precipitación Química.....	24
1.2.6.1.5 Electrocoagulación.....	24
1.2.6.1.6 Flotación.....	24
1.2.6.2 Técnicas No Convencionales	24
1.2.6.2.1 Adsorbentes de Bajo Costo y Nuevos Adsorbentes	24
1.2.6.2.2 Biopolímeros	25
1.2.6.2.3 Hidrogeles	25
1.2.6.2.4 Fitorremediación	25
1.2.7 Fitodepuración.....	25
1.2.8 Humedales.....	27
1.2.8.1 Clasificación de los Humedales Artificiales	27
1.2.8.1.1 Humedales Artificiales con Superficie de Agua Libre	27
1.2.8.1.1.1 Sistemas con Macrófitas Flotantes.....	27
1.2.8.1.1.2 Sistemas con Macrófitas Sumergidas.....	28
1.2.8.1.1.3 Sistemas con Macrófitas Emergentes.....	29
1.2.8.1.2 Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo	29
1.2.9 Biofiltros	30
1.2.9.1 Biofiltro de Flujo Horizontal.....	30
1.2.9.2 Biofiltro de Flujo Vertical.....	31
1.2.9.3 Componentes Principales de un Biofiltro	32
1.2.9.3.1 Lecho Filtrante	32
1.2.9.3.2 Plantas Macrófitas.....	34
1.2.9.3.3 Microorganismos	35

1.2.9.4 Mecanismos de Remoción en un Biofiltro.....	35
1.2.9.5 Mecanismo de Remoción de Metales Pesados por Plantas y Sustrato.....	37
1.2.9.5.1 Procesos de Remoción en el Biofiltro de Totora	37
1.2.9.5.2 Procesos de Remoción en el Sustrato.....	38
1.2.10 Plantas Depuradoras para el Tratamiento de Aguas	39
1.2.10.1 Jacinto de Agua (Eichhornia crassipes)	39
1.2.10.2 Lechuga de Agua (Pistia stratiotes).....	41
1.2.10.3 Lenteja de Agua (Lemma Minor)	43
1.2.10.4 Totora (Scirpus californicus).....	45
1.2.10.5 Totora (Typha Domingensis)	48
1.2.11 Trabajos Realizados por Otros Autores	51

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

Introducción	54
2.1 Descripción del Equipamiento Experimental.....	56
2.1.2.1 Lecho Filtrante	57
2.1.2.2 Totora	58
2.2 Diagnóstico del Efluente de la Mina Perales	59
2.3 Metodología de la Investigación	61
2.3.1 Acondicionamiento del Sistema de Biofiltración	62
2.3.2 Montaje del Sistema de Biofiltración.....	62
2.3.3 Tiempo de Acondicionamiento de las Totoras	63
2.3.4 Recolección del Agua del Efluente de la Mina Perales	64

2.3.5 Funcionamiento del Sistema de Biofiltración	65
2.3.5.1 Variables de estudio	65
2.3.5.2 Puesta en Marcha del Biofiltro.....	65
2.3.5.3 Estudio de Volúmenes.....	65
2.3.5.4 Tratamiento con 50 Plantas de Totora	66
2.3.5.5 Tratamiento con 25 Plantas de Totora	67
2.3.5.6 Toma de Muestras.....	67
2.3.5.7 Análisis de Laboratorio	69
2.4 Diseño Experimental.....	69
2.4.1 Elección del Diseño Experimental.....	70
2.4.1.1 Estudio de los Factores	70
2.4.2 Pasos para realizar el Diseño Factorial	71
2.4.2.1 Elección de las Variables a Medir: Respuestas.....	71
2.4.2.2 Elección de las Variables de Operación: Factores	71
2.4.2.3 Elección de los intervalos de operación para cada una de las variables de operación: niveles.....	71
2.4.3 Construcción de un diseño factorial completo 2^k	72
2.4.3.1 Dominio Experimental ó Matriz de Diseño	74

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Caracterización de las Aguas del Efluente de la Mina Perales en cuanto a Plomo, Cadmio y Zinc en base al RMCH	77
3.2 Parte Experimental	78
3.2.1 Resultados de la Primera Parte Experimental	78

3.2.1.1. Comportamiento del Plomo en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora	79
3.2.1.2 Comportamiento del Plomo en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora.....	80
3.2.1.3 Comparación de Ambas Réplicas del Plomo	81
3.2.1.4 Comportamiento del Cadmio en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora.....	81
3.2.1.5 Comportamiento del Cadmio en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora.....	83
3.2.1.6 Comparación de Ambas Réplicas del Cadmio.....	84
3.2.1.7 Comportamiento del Zinc en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora ...	84
3.2.1.8 Comportamiento del Zinc en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora ..	85
3.2.1.9 Comparación de Ambas Réplicas de Zinc	86
3.2.2 Resultados de la Segunda Parte Experimental	87
3.2.2.1 Comportamiento del Plomo en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora.....	87
3.2.2.2 Comportamiento del Plomo en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora.....	88
3.2.2.3 Comparación de Ambas Réplicas de Plomo	90
3.2.2.4 Comportamiento del Cadmio en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora.....	90
3.2.2.5 Comportamiento del Cadmio en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora.....	91
3.2.2.6 Comparación de Ambas Réplicas de Cadmio.....	92
3.2.2.7 Comportamiento del Zinc en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora ...	92
3.2.2.8 Comportamiento del Zinc en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora ..	93

3.2.2.9 Comparación de Ambas Réplicas de Zinc	94
3.2.3 Saturación del Sistema	94
3.3 Balance de Materia.....	95
3.3.1 Balance de Materia para la Primera Parte Experimental	95
3.3.1.1 Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 50 Plantas de Totora.....	95
3.3.1.2 Balance Parcial de Metales Pesados con 50 Plantas de Totora Primera y Segunda Réplica.....	96
3.3.1.2.1 Balance Parcial del Plomo	96
3.3.1.2.2 Balance Parcial del Cadmio	98
3.3.1.2.3 Balance Parcial del Zinc.....	100
3.3.2 Resumen del Balance de Materia para la Primera Parte Experimental.....	102
3.3.3 Balance de Materia para la Segunda Parte Experimental	103
3.3.3.1 Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 25 Plantas de Totora.....	103
3.3.3.2 Balance Parcial de Metales Pesados con 25 Plantas de Totora Primera y Segunda Réplica.....	104
3.3.3.3 Balance Parcial del Plomo	104
3.3.4 Resumen del Balance de Materia para la Segunda Parte Experimental.....	106
3.4 Acumulación de Metales Pesados en la Totora y en el Sustrato.....	106
3.4.1 Resultados de Laboratorio de Spectrolab.....	106
3.4.2 Cálculo de la Acumulación de Metales Pesados en la Totora	107
3.4.2.1 Cálculo para el Plomo	108
3.4.2.2 Cálculo para el Cadmio.....	108
3.4.2.3 Cálculo para el Zinc	108
3.4.3 Cálculo de la Acumulación de Metales Pesados en el Sustrato	108

3.5 Comparación de los Resultados de Metales Acumulados en Totora y Sustrato vs Balance de Materia.....	109
3.6 Rendimiento del Sistema	113
3.6.1 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera y Segunda Réplica para el Plomo.....	113
3.6.2 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica y Segunda para el Cadmio	115
3.6.3 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica y Segunda para el Zinc.....	116
3.6.4 Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención Primera y Segunda Réplica para el Plomo.....	117
3.7 Caracterización del Efluente del Biofiltro en cuanto a Plomo, Cadmio y Zinc en base al RMCH.....	119
3.7.1 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica.....	119
3.7.2 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica.....	120
3.7.3 Caracterización en Relación al Cadmio utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica.....	121
3.7.4 Caracterización en Relación al Cadmio utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica.....	122
3.7.5 Caracterización en Relación al Zinc utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica.....	123
3.7.6 Caracterización en Relación al Zinc utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica.....	124

3.7.7 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 25 Plantas de Totora Primera Réplica.....	125
3.7.8 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 25 Plantas de Totora Segunda Réplica.....	126

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones	128
4.2 Recomendaciones.....	132
Bibliografía	133

INDICE DE TABLAS

Tabla I-1. Caracterización de Fuentes de Componentes Químicos	11
Tabla I-2. Clasificación de las Aguas Residuales de Mina en Función al pH	22
Tabla I-3. Clasificación de la Fitodepuración	26
Tabla I-4. Mecanismos de Remoción en un Biofiltro	36
Tabla I-5. Clasificación Taxonómica del Jacinto de Agua (Eichhornia Crassipes)....	40
Tabla I-6. Clasificación Taxonómica de la Lechuga de Agua (Pistia Stratiotes)	42
Tabla I-7. Clasificación Taxonómica de la Lenteja de Agua (Lemma Minor).....	44
Tabla I-8. Clasificación Taxonómica de la Totora (Scirpus Californicus)	46
Tabla I-9. Clasificación Taxonómica de la Totora (Typha Domingensis).....	49
Tabla II-1. Dimensiones del Biofiltro	57
Tabla II-2. Textura del Sustrato	58
Tabla II-3. Taxonomía de la Totora	59
Tabla II-4. Variables Elegidas.....	73

Tabla II-5. Matriz de Diseño.....	74
Tabla II-6. Plan de Experimentación de los Factores en Estudio	75
Tabla II-7. Diseño Factorial	76
Tabla III-1. Caracterización de las Aguas del Efluente de la Mina Perales.....	77
Tabla III-2. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	79
Tabla III-3. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	80
Tabla III-4. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	82
Tabla III-5. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	83
Tabla III-6. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	84
Tabla III-7. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	85
Tabla III-8. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totorá.....	87
Tabla III-9. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totorá.....	89
Tabla III-10. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totorá.....	91
Tabla III-11. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totorá.....	92
Tabla III-12. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totorá.....	93

Tabla III-13. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora.....	93
Tabla III-14. Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 50 Plantas de Totora	96
Tabla III-15. Balance Parcial del Pb Primera Réplica en Concentración	96
Tabla III-16. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en Concentración	97
Tabla III-17. Balance Parcial del Pb Primera Replica en mg/g	97
Tabla III-18. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en mg/g	98
Tabla III-19. Balance Parcial del Cd Primera Réplica en Concentración.....	98
Tabla III-20. Balance Parcial del Cd Segunda Réplica en Concentración.....	99
Tabla III-21. Balance Parcial del Cd Primera Replica en mg/g.....	99
Tabla III-22. Balance Parcial del Cd Segunda Replica en mg/g.....	100
Tabla III-23. Balance Parcial del Zn Primera Réplica en Concentración	100
Tabla III-24. Balance Parcial del Zn Segunda Réplica en Concentración	101
Tabla III-25. Balance Parcial del Zn Primera Replica en mg/g	101
Tabla III-26. Balance Parcial del Zn Segunda Replica en mg/g	102
Tabla III-27. Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 25 Plantas de Totora	103
Tabla III-28. Balance Parcial del Pb Primera Réplica en Concentración	104
Tabla III-29. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en Concentración	104
Tabla III-30. Balance Parcial del Pb Primera Replica en mg/g	105
Tabla III-31. Balance Parcial del Pb Primera Replica en mg/g	105
Tabla III-32. Concentración de los Metales en el Sustrato	107
Tabla III-33. Concentración de los Metales en la Totora.....	107
Tabla III-34. Datos Adicionales para Calculo de Acumulación en la Totora.....	108
Tabla III-35. Datos Adicionales para Calculo de Acumulación en el Sustrato	109

Tabla III-36. Acumulación de Pb en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g.....	109
Tabla III-37. Acumulación de Pb en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g	110
Tabla III-38. Acumulación de Cd en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g.....	110
Tabla III-39. Acumulación de Cd en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g	110
Tabla III-40. Acumulación de Zn en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g.....	111
Tabla III-41. Acumulación de Zn en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g	111
Tabla III-42. Acumulación total de Metales Pesados en la Primera y Segunda Réplica con 50 Plantas	111
Tabla III-43. Acumulación Total según Análisis de Laboratorio	112
Tabla III-44. Comparación de Resultados de Acumulación de Metales del Balance de Materia vs Análisis de Laboratorio	112
Tabla III-45 Acumulación en el Sustrato	113
Tabla III-46. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica para el Pb.....	114
Tabla III-47. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Segunda Réplica para el Pb.....	114
Tabla III-48. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica para el Cd	115
Tabla III-49. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Segunda Réplica para el Cd	116

Tabla III-50. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención- Primera Réplica para el Zn.....	117
Tabla III-51. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención- Segunda Réplica para el Zn.....	117
Tabla III-52. Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención- Primera Réplica para el Pb.....	118
Tabla III-53. Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención- Segunda Réplica para el Pb.....	118
Tabla III-54. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica.....	119
Tabla III-55. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica.....	120
Tabla III-56. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica.....	121
Tabla III-57. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica.....	122
Tabla III-58. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica.....	123
Tabla III-59. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica.....	124
Tabla III-60. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Primera Réplica.....	125
Tabla III-61. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Segunda Réplica.....	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sistemas con Macrófitas Flotantes	28
Figura 1-2. Sistemas con Macrófitas Sumergidas.....	28
Figura 1-3. Sistemas con Macrófitas Emergentes.....	29
Figura 1-4. Biofiltro de Flujo Horizontal.....	31
Figura 1-5. Biofiltro de Flujo Vertical	32
Figura 1-6. Componentes Principales de un Biofiltro.....	34
Figura 1-7. Jacinto de Agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	39
Figura 1-8. Lechuga de Agua (<i>Pistia stratiotes</i>).....	41
Figura 1-9. Lenteja de Agua (<i>Lemna Minor</i>).....	43
Figura 1-10. Totorá (<i>Scirpus californicus</i>).....	46
Figura 1-11. Totorá (<i>Typha Domingensis</i>)	48
Figura 1-12. Morfología de la Totorá (<i>Typha Domingensis</i>)	50
Figura 2-1. Diagrama de Flujo del proceso de Tratamiento	55
Figura 2-2. Sistema de Biofiltración	55
Figura 2-3. Efluente de la Mina Perales.....	60
Figura 2-4. Metodología Experimental	61
Figura 2-5. Armazón del Biofiltro	62
Figura 2-6. Adecuación de la Totorá.....	64
Figura 2-7. Muestras Recolectadas del Efluente del Biofiltro	68
Figura 2-8. Sistema de Diseño Factorial.....	70
Figura 3-1. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totorá.....	79

Figura 3-2. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora.....	81
Figura 3-3. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora.....	82
Figura 3-4. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora.....	83
Figura 3-5. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora.....	85
Figura 3-6. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora.....	86
Figura 3-7. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora.....	88
Figura 3-8. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora.....	89
Figura 3-9. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica	120
Figura 3-10. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica	121
Figura 3-11. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica.....	122
Figura 3-12. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica	123
Figura 3-13. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica.....	124
Figura 3-14. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica.....	125
Figura 3-15. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Primera Réplica	126
Figura 3-16. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Segunda Réplica	127

ANEXOS

Anexo 1: Normativas

Anexo 2: Taxonomía de la Totora

Anexo 3: Análisis de Textura del Sustrato

Anexo 4: Análisis de Laboratorio CEANID

Anexo 5: Análisis de Laboratorio Spectrolab

Anexo 6: Diseño Factorial

Anexo 7: Archivo Fotográfico