



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

**EFICIENCIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE
METALES PESADOS DE AGUAS DEL RÍO PRIETO,
SANTA BÁRBARA ALMOLOYA, PUEBLA**

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

ADFERNEE LÓPEZ VELÁSQUEZ

Directora de Tesis:

Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega

Codirector de Tesis:

Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

INSTITUTO DE CIENCIAS



POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

**EFICIENCIA DE LA FITOEXTRACCIÓN DE
METALES PESADOS DE AGUAS DEL RÍO PRIETO,
SANTA BÁRBARA ALMOLOYA, PUEBLA**

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

ADFERNEE LÓPEZ VELÁSQUEZ

Comité Tutorial:

Tutora	Dra. Anabella Handal Silva
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gabriela Pérez Osorio
Integrante Comité Tutorial	Dra. Edith Chávez Bravo

Dedicatoria

Quisiera dedicar este trabajo a mi mamá que me apoyó durante los 2 años que duró esta maestría, por estar conmigo en los momentos difíciles y darme ánimos de continuar hasta el final.

A mi tío, que fue una persona incondicional en mi vida y a pesar de que ya no está conmigo siempre creyó que podría lograr cualquier cosa que me propusiera, espero que estes donde estes puedas ver lo lejos que he llegado.

De igual forma, esta dedicatoria es para mi pareja, quien me escuchó y alentó que no me diera por vencida, que soportó el no verme durante un período de tiempo largo, pero aun así me daba el apoyo que necesitaba y entendía el porqué de todo, espero que sepas que esto también es una parte para ti.

A mis directores la Dra. Rosalía y el Dr. Tamariz que fueron increíbles instructores y dieron todo de sí para poder sacar adelante esta tesis a pesar de las circunstancias por las que atravesamos estos últimos años. Espero que sepan que este trabajo es la culminación del esfuerzo de todos.

Agradecimiento

Al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Puebla por darme las herramientas necesarias en mi carrera que me permitieron trascender al nivel en el que estoy.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme el financiamiento necesario para poder realizar este proyecto y obtener los resultados que se presentan. Fueron una fuente importante en este trayecto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN _____	- 13 -
ABSTRACT _____	- 14 -
INTRODUCCIÓN _____	- 15 -
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA _____	- 17 -
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN _____	- 19 -
HIPÓTESIS _____	- 19 -
OBJETIVO GENERAL _____	- 19 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	- 19 -
JUSTIFICACIÓN _____	- 19 -
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES _____	- 21 -
1.1. Estado del Arte _____	- 21 -
1.2. Marco Teórico _____	- 24 -
1.2.1. Fuentes de contaminación del agua: Aguas Residuales _____	- 24 -
1.2.2. Problemas con el tratamiento de aguas residuales. _____	- 25 -
1.3. Metales Pesados _____	- 29 -
1.3.1. Fuentes Emisoras _____	- 30 -
1.3.2. Afectaciones a la salud _____	- 32 -
1.3.3. Afectaciones al Medio Ambiente. _____	- 33 -
1.4. Marco Legal _____	- 34 -
CAPÍTULO 2. FITORREMEDIACIÓN _____	- 35 -
2.1. Fitorremediación _____	- 35 -
2.2. Métodos de fitorremediación para el saneamiento de los cuerpos de agua en el proyecto de investigación. _____	- 38 -
2.3. Utilización de plantas en el proceso de fitorremediación _____	- 40 -
2.3.1. Lirio Acuático _____	- 40 -
2.3.1.1. Morfología _____	- 41 -
2.3.1.2. Reproducción _____	- 42 -
2.3.1.3. Potencial fitorremediador _____	- 43 -
2.3.2. Vetiver _____	- 43 -
2.3.2.1. Morfología. _____	- 44 -
2.3.2.2. Crecimiento y Reproducción _____	- 45 -
2.3.2.3. Potencial fitorremediador _____	- 45 -
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y EXPERIMENTACIÓN _____	- 46 -
3.1. San Pedro Cholula _____	- 46 -
3.1.1. Hidrografía. _____	- 46 -

3.1.2. <i>Clima</i>	- 46 -
3.1.3. <i>Precipitación</i>	- 47 -
3.2. <i>Junta Auxiliar de Santa Bárbara Almoloya.</i>	- 48 -
3.2.1. <i>Hidrología</i>	- 48 -
3.3. <i>Zona de Implementación de Proyecto Experimental</i>	- 49 -
3.3.1. <i>Cuautlancingo.</i>	- 49 -
3.3.1.1. <i>Hidrología</i>	- 51 -
3.3.1.2. <i>Clima.</i>	- 52 -
3.3.1.3. <i>Precipitación</i>	- 52 -
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	- 53 -
4.1. <i>Fases Metodológicas</i>	- 53 -
4.1.1. <i>Fase de Gabinete.</i>	- 54 -
4.1.2. <i>Fase de Campo</i>	- 54 -
4.1.3. <i>Fase de Laboratorio</i>	- 56 -
4.1.4. <i>Fase de Fitoextracción</i>	- 57 -
4.1.4.1. <i>Selección Vegetal.</i>	- 57 -
4.1.4.2. <i>Adaptación.</i>	- 57 -
4.1.4.3. <i>Ensayos de fitoextracción</i>	- 58 -
4.1.4.4. <i>Medición de metales pesados.</i>	- 59 -
4.1.4.5. <i>Factores de Bioconcentración (FCB) y Traslocación (FT).</i>	- 59 -
4.1.4.6. <i>Tasa de Remediación.</i>	- 60 -
4.1.5. <i>Fase de Integración.</i>	- 61 -
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	- 61 -
5.1. <i>Encuestas y Entrevistas</i>	- 61 -
5.2. <i>Parámetros fisicoquímicos preliminares del río Prieto</i>	- 62 -
5.3. <i>Parámetros químicos del agua de manantial y pozo</i>	- 66 -
5.4. <i>Modelo de Integración de la Situación del Río Prieto.</i>	- 67 -
5.5. <i>Análisis preliminar de metales pesados</i>	- 69 -
5.6. <i>Análisis del contenido de metales pesados (mg/L) en los puntos del río y manantial.</i>	- 71 -
5.6.1. <i>Punto de Muestreo de Río #1 (MR1)</i>	- 71 -
5.6.2. <i>Punto de Muestreo de Río #2 (MR2)</i>	- 73 -
5.6.3. <i>Punto de Muestreo de Río #3 (MR3)</i>	- 74 -
5.6.4. <i>Punto de Muestreo Manantial Iglesia</i>	- 75 -
5.6.5. <i>Punto de Muestreo Pozo</i>	- 77 -
5.7. <i>Análisis de fitoextracción en los puntos del Río y Manantial</i>	- 79 -
5.7.1. <i>Comportamiento Lirio acuático</i>	- 79 -
5.7.2. <i>Comportamiento Vetiver</i>	- 84 -
5.8. <i>Factor de Bioconcentración (FBC)</i>	- 89 -
5.9. <i>Factor de Traslocación.</i>	- 100 -
5.10. <i>Eficiencia de remoción de metales pesados</i>	- 112 -
CONCLUSIONES	- 115 -
REFERENCIAS	- 118 -

ANEXOS	- 127 -
<i>ANEXO A. Encuestas y Entrevistas.</i>	- 127 -
<i>ANEXO B. Concentraciones de metales pesados por período de experimentación-</i>	- 130 -
<i>ANEXO C. Tasas de Remoción por período de tratamiento.</i>	- 137 -
- TRATAMIENTO LIRIO ACUÁTICO	- 137 -
- TRATAMIENTO VETIVER	- 139 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes naturales emisoras de metales pesados. _____	- 30 -
Tabla 2. Fuentes antropogénicas emisoras de metales pesados. _____	- 31 -
Tabla 3. Resultados del análisis preliminar de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua del río Prieto. _____	- 62 -
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del punto #2 del río Prieto en 2022. _____	- 65 -
Tabla 5. Parámetros químicos del manantial y pozo de la Iglesia de Santa Bárbara Almoloya. _____	- 66 -
Tabla 6. Concentraciones de metales pesados en mg/L de las muestras de ambos cuerpos de agua que se utilizaron para llenar las tinas experimentales. _____	- 69 -
Tabla 7. Análisis de previo de metales pesados en Lirio Acuático (<i>E. crassipes</i>) y Vetiver (<i>C. zizanioides</i>). _____	- 70 -
Tabla 8. Soluciones patrón de los cuatro metales a analizar que sirven de valores de referencia en la medición de las concentraciones de las muestras de agua. _____	- 70 -
Tabla 9. Límites máximos permisibles de concentraciones en mg/L de metales pesados en Ríos, Arroyos, Canales y Drenes. PROY-NOM-001 – SEMARNAT – 2021. _____	- 71 -
Tabla 10. Concentración de metales pesados (mg/L) en aguas del punto #1 del Río Prieto – Tratamiento Lirio acuático. _____	- 71 -
Tabla 11. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en el punto #1 del río Prieto – Tratamiento con Vetiver. _____	- 72 -
Tabla 12. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en el punto #2 del río Prieto – Tratamiento con Lirio acuático. _____	- 73 -
Tabla 13. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #2 del río Prieto – Tratamiento con Vetiver. _____	- 73 -
Tabla 14. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #3 del río Prieto – Tratamiento con Lirio acuático. _____	- 74 -
Tabla 15. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #3 del río Prieto - Tratamiento Vetiver. _____	- 75 -
Tabla 16. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en manantial de la iglesia – Tratamiento con Lirio acuático. _____	- 75 -
Tabla 17. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en manantial de la iglesia – Tratamiento con Vetiver. _____	- 76 -
Tabla 18. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en pozo de la iglesia – Tratamiento con Lirio acuático. _____	- 77 -
Tabla 19. Concentración de metales pesados (mg/L) en el pozo de la iglesia – Tratamiento con Vetiver. _____	- 77 -
Tabla 20. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #1 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 79 -
Tabla 21. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #2 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 79 -
Tabla 22. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Lirio Acuático en el punto #3 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 80 -
Tabla 23. Concentración de metales pesados (mg/L) de la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el manantial de la iglesia al final del período de exposición. _____	- 81 -
Tabla 24. Concentración de metales pesados (mg/L) de la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el pozo de la iglesia al final del período de exposición. _____	- 81 -
Tabla 25. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Vetiver en el punto #1 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 84 -
Tabla 26. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el punto #2 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 84 -
Tabla 27. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el punto #3 del río Prieto al final del período de exposición. _____	- 85 -
Tabla 28. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el manantial de la iglesia al final del período de exposición. _____	- 86 -

Tabla 29. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el pozo de la iglesia al final del período de exposición.	- 86 -
Tabla 30. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 90 -
Tabla 31. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 90 -
Tabla 32. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 90 -
Tabla 33. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Lirio acuático.	- 91 -
Tabla 34. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Lirio acuático.	- 91 -
Tabla 35. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 94 -
Tabla 36. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 95 -
Tabla 37. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 95 -
Tabla 38. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Vetiver.	- 95 -
Tabla 39. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Vetiver.	- 96 -
Tabla 40. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 101 -
Tabla 41. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 101 -
Tabla 42. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Lirio acuático.	- 101 -
Tabla 43. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Lirio acuático.	- 102 -
Tabla 44. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Lirio acuático.	- 102 -
Tabla 45. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 107 -
Tabla 46. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 107 -
Tabla 47. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Vetiver.	- 108 -
Tabla 48. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Vetiver.	- 108 -
Tabla 49. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Vetiver.	- 109 -
Tabla 50. Tasa de remoción de metales pesados con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver en aguas del punto de muestreo #1 del Río.	- 112 -
Tabla 51. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo #2 del Río.	- 112 -
Tabla 52. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo #3 del Río.	- 113 -
Tabla 53. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo del manantial.	- 113 -
Tabla 54. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo del pozo.	- 114 -

ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

Figura 1. Mapa de generación de agua residual por entidad federativa en México (CONAGUA, SEMARNAT, 2013).	- 26 -
Figura 2. Descripción gráfica de la alteración del ciclo del agua con la presencia de aguas residuales (WWAP, 2010)	- 28 -
Figura 3. Ciclo de contaminación en cuerpos de agua por metales pesados provenientes de diversos procesos antropogénicos (Elm, 2015).	- 33 -
Figura 4. Proceso de fitorremediación dividido en las 6 subcategorías que pueden llevarse a cabo por una planta (Favas et al., 2014).	- 36 -
Figura 5. Proceso de fitodegradación de la planta a nivel microscópico (ITCR, 2001, citado por Longley, 2007).	- 39 -
Figura 6. Proceso de fitoextracción donde se muestra el comportamiento del contaminante una vez es adquirido por la planta (ITCR, 2001; citado por Longley, 2007).	- 40 -
Figura 7. Lirio Acuático (<i>Eichhornia crassipes</i> (Tenorio, 2005).	- 41 -
Figura 8. Morfología del lirio acuático (Martínez Morales, 2011).	- 42 -
Figura 9. Vetiver adulto, muestra el largo que puede llegar a tener la raíz y la hoja (Andrade, s/f).	- 44 -
Figura 10. Gráfico de probabilidad diaria de precipitación anual en el municipio de San Pedro Cholula (Weather Spark, 2021).	- 47 -
Figura 11. Mapa de la zona de estudio con los puntos de muestro del río (Elaboración propia).	- 48 -
Figura 12. Mapa de hidrología de las regiones hidrológicas de San Pedro Cholula (Elaboración propia).	- 49 -
Figura 13. Mapa del municipio de Cuautlancingo (Elaboración propia).	- 50 -
Figura 14. Mapa hidrográfico del municipio de Cuautlancingo (Elaboración propia).	- 51 -
Figura 15. Gráfico de probabilidad de precipitación en el municipio de Cuautlancingo durante un año (Weather Spark, 2021).	- 53 -
Figura 16. Diagrama de metodología dividido por fases de aplicación en el proyecto (Elaboración propia).	- 53 -
Figura 17. Escala de clasificación de calidad de agua con base en coliformes fecales.	- 63 -
Figura 18. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO5).	- 63 -
Figura 19. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la demanda química de oxígeno (DQO).	- 64 -
Figura 20. Escala de clasificación de calidad del agua con base en los sólidos totales suspendidos (SST).	- 64 -
Figura 21. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la Toxicidad.	- 65 -
Figura 22. Esquema DPSIR de la situación de contaminación del Río Prieto en la comunidad de Santa Bárbara Almoloya, Puebla, México (Elaboración propia).	- 67 -
Figura 23. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #1 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).	- 72 -
Figura 24. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #1 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).	- 72 -
Figura 25. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #2 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).	- 73 -
Figura 26. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #2 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).	- 74 -
Figura 27. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #3 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).	- 74 -
Figura 28. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #3 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).	- 75 -
Figura 29. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el manantial de la iglesia con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).	- 76 -

Figura 30. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el manantial de la iglesia con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).	- 76 -
Figura 31. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el pozo de la iglesia con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).	- 77 -
Figura 32. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el pozo de la iglesia con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).	- 78 -
Figura 33. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #1 del río (Elaboración propia).	- 79 -
Figura 34. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #2 del río (Elaboración propia).	- 80 -
Figura 35. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #3 del río (Elaboración propia).	- 80 -
Figura 36. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el manantial de la iglesia (Elaboración propia).	- 81 -
Figura 37. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el pozo de la iglesia (Elaboración propia).	- 82 -
Figura 38. Estadístico de Welch para una prueba T de dos muestras independientes donde se aprecian los valores de t, grados de libertad y valor de p.	- 82 -
Figura 39. Gráfico de medias de la concentración de las partes vegetativas en los 5 puntos de muestreo analizados.	- 83 -
Figura 40. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbido vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #1 del río (Elaboración propia).	- 84 -
Figura 41. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #2 del río (Elaboración propia).	- 85 -
Figura 42. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #3 del río (Elaboración propia).	- 85 -
Figura 43. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el manantial de la iglesia (Elaboración propia).	- 86 -
Figura 44. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el pozo de la iglesia (Elaboración propia).	- 87 -
Figura 45. Prueba T Welch para dos muestras independientes de los órganos vegetativos con tratamiento de Vetiver.	- 87 -
Figura 46. Gráfico de concentraciones en las partes vegetativas del Vetiver en las cinco tinas experimentales.	- 88 -
Figura 47. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 92 -
Figura 48. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 92 -
Figura 49. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 93 -
Figura 50. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 93 -
Figura 51. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 94 -
Figura 52. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 96 -
Figura 53. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 97 -
Figura 54. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 97 -
Figura 55. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 98 -

Figura 56. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 98 -
Figura 57. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 103 -
Figura 58. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 103 -
Figura 59. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 104 -
Figura 60. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 104 -
Figura 61. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).	- 105 -
Figura 62. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #1 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 109 -
Figura 63. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #2 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 110 -
Figura 64. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #3 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 110 -
Figura 65. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 111 -
Figura 66. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).	- 111 -

Imagen 2. Lirios acuáticos recién recolectados en charolas de adaptación (Elaboración propia). - 58 -

Imagen 1. Vetiveres recién recolectados en botes en el proceso de adaptación (Elaboración propia). - 58 -

Imagen 3. Tinajas experimentales con las dos especies de plantas, el primer día del ensayo (Elaboración propia). - 58 -

Imagen 4. Proceso de filtración de las muestras después de salir del digestor ácido y haberse enfriado (Elaboración propia). - 59 -

Imagen 5. Molido de las muestras de tejido vegetal de *E. crassipes* y *C. zizanioides* (Elaboración propia). - 59 -

Imagen 6. Análisis de Alcalinidad de las muestras de agua (Elaboración propia). - 66 -

Imagen 7. Análisis de conductividad eléctrica y salinidad (Elaboración propia). - 66 -

Imagen 8. Muestras de agua dentro del digestor ácido. (Elaboración propia). - 69 -

Imagen 9. Ingreso de parámetros en el equipo de digestión ácida para procesar las muestras de agua (Elaboración propia). - 69 -

Imagen 10. Análisis de metales pesados en el equipo de espectrofotometría de absorción atómica (Elaboración propia). - 69 -

RESUMEN

En México, más de 70% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación, lo que ocasiona graves problemas de disponibilidad y acceso a este líquido vital siendo la industria de producción y la agricultura las que consumen la mayor parte de dicho recurso disponible en el país. Se pueden encontrar algunos metales pesados altamente tóxicos como el mercurio, plomo, cromo, cadmio y otros compuestos dañinos como el tolueno o el benceno.

Una solución factible y con beneficios ambientales es la fitorremediación, en específico la fitoextracción en donde se utilizan las raíces de las plantas para absorber los contaminantes. Las especies de plantas utilizadas para evaluar la efectividad de absorción de metales pesados fueron *Chrysopogon zizanioides* y *Eichhornia crassipes*, donde mediante la implementación de soportes flotantes en tinajas con agua del río Prieto se analizó el comportamiento de ambas especies y la capacidad de remoción durante 8 meses. Los resultados obtenidos indicaron que *E. crassipes* es ideal para medios contaminados con plomo y/o zinc teniendo una absorción del 90.87% del primero y 98.61% del segundo; en cuanto a medios con níquel y/o cobre es ideal el uso de *C. zizanioides* con una remoción del 99.63% y 94.25% respectivamente.

Palabras clave: fitorremediación, fitoextracción, metales pesados, capacidad de remoción.

ABSTRACT

In Mexico, more than 70% of the bodies of water present some degree of contamination, which causes serious problems of availability and access to this vital liquid, with the production industry and agriculture consuming most of said resource available in Mexico. the country. Some highly toxic heavy metals such as mercury, lead, chromium, cadmium, and other harmful compounds such as toluene or benzene can be found.

A feasible solution with environmental benefits is phytoremediation, specifically phytoextraction where plant roots are used to absorb pollutants. The plant species used to evaluate the effectiveness of heavy metal absorption were *Chrysopogon zizanioides* and *Eichhornia crassipes*, whereby implementing floating supports in tubs with water from the Prieto River, the behavior of both species and the removal capacity were analyzed for 8 months. The results obtained indicated that *E. crassipes* is ideal for medium contaminated with lead and/or zinc, having an absorption of 90.87% of the first and 98.61% of the second; As for media with nickel and/or copper, the use of *C. zizanioides* is ideal, with a removal of 99.63% and 94.25%, respectively.

Key words: phytoremediation, phytoextraction, heavy metals, removal capacity.

INTRODUCCIÓN

Es interesante y preocupante saber que el pensamiento humano es algo muy difícil de cambiar, el hombre sigue teniendo la errónea idea de que el agua es un recurso renovable infinito y eterno. Es correcto afirmar que el planeta está conformado mayoritariamente por el recurso hídrico, básicamente el 98% de este líquido es salado y se puede encontrar concentrado en los océanos. El panorama es algo triste en el sentido de que únicamente el 2% restante es de agua dulce y de que si desglosamos ese porcentaje de líquido potencialmente bebible, descubriremos que el 68.9% del agua dulce disponible en la Tierra está congelada en los polos en forma de glaciares y nieve; el 30.8% es agua subterránea y sólo 0.3% es superficial y está localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales (Denzin *et al.*, 2017).

A pesar de su escasez, este líquido vital puede ser suficiente para todos los seres vivos que ocupamos el planeta, incluyendo a los actuales 7.4 mil millones de consumidores humanos y los que se acumularán en las siguientes dos décadas, antes de que la población se estabilice, hacia 2050, en los 9 mil millones de personas. Pero esta disponibilidad futura del agua no podrá alcanzarse si mantenemos las formas vigentes irracionales de uso de los ecosistemas y el consumo desmedido de la misma (Perevochtchikova, 2016).

En México, más de 70% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación, lo que ocasiona graves problemas de disponibilidad y acceso a este líquido vital (CONAGUA, 2010).

La contaminación química del agua se da debido a que existe una alteración en el ciclo natural de la misma, donde actividades agropecuarias o industriales utilizan agentes tóxicos y compuesto orgánicos e inorgánicos en sus procesos y, una vez que estos terminan, no tratan previamente el agua antes de que continúe con su ciclo (Barceló, 2006).

La industria de producción y la agricultura consumen la mayor parte del agua disponible en el país. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) la agricultura utiliza alrededor del 70% del agua, mientras que la industria solo cerca del 14%, a pesar de tener un porcentaje tan bajo comparado con la agricultura, la industria genera altas cantidades de contaminación que son equivalentes a las que producirían 100 millones de habitantes. Otro dato adicional es que las industrias que producen los contaminantes con mayor impacto ambiental son la petrolera y química junto con la azucarera (Maguey, 2018).

En los ríos de México se pueden encontrar algunos metales pesados altamente tóxicos como el mercurio, plomo, cromo, cadmio y otros compuestos dañinos como el tolueno o el benceno. Sin embargo, se desconoce con precisión la mayoría de los compuestos tóxicos (según fuente contaminante o cantidades diarias) que están en los ríos (CONAGUA, 2010).

De manera más local, el estado de Puebla presenta casos graves de contaminación en los ríos Atoyac y Alseseca, que resultan de las descargas de aguas residuales provenientes de las principales actividades económicas como los servicios y, fundamentalmente, la industria en sus diferentes ramos. En la zona sur del estado y en el área de la mixteca las aguas son escasas, de poco caudal y con problemas de contaminación severos (PADHPOT, 2010).

Por tal motivo es de suma importancia encontrar métodos de saneamiento adecuados y eficientes para devolver a su estado original (o lo más cercano a) los cuerpos de agua que se encuentran contaminados en el estado, por la necesidad y urgencia que existe respecto al futuro incierto de este recurso.

La fitorremediación es un método que utiliza plantas verdes para el tratamiento y control de residuos presentes en el agua, suelo o aire (McCutcheon & Jorgensen, 2008). Asimismo, se puede recurrir a las plantas genéticamente modificadas para la extracción de un amplio rango de metales pesados y contaminantes orgánicos

(Peuke & Rennenberg, 2005). Es un método muy prometedor, debido a las formas en las que puede aplicarse sobre el medio contaminado y que aprovecha los procesos bioquímicos realizados por las plantas asociados a ellas (Delgadillo – López, 2011).

Sin embargo, es importante establecer que las plantas no pueden hacer todo el trabajo por si solas, se requiere del apoyo e involucramiento de las partes interesadas para que tecnologías de esta índole puedan lograr los objetivos de saneamiento de ambientes degradados.

Este proyecto de investigación busca aplicar un método alternativo y ecológico para la eliminación de compuestos tóxicos como metales pesados presentes en cuerpos de agua contaminados, mediante la utilización de plantas como el Lirio (*Eichhornia crassipes*) y Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para cumplir con este propósito. Se busca desarrollar una comparativa para determinar la eficiencia de estas plantas en el proceso de remoción de metales pesados y otros compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentren presentes en la zona de estudio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es uno de los recursos naturales vitales que se ha visto afectado por la actividad humana excesiva en nuestro país y en el mundo entero. Se puede observar cómo ríos, lagos y otros cuerpos de agua cuentan con toneladas de basura y grandes cantidades de descargas de aguas contaminadas y, a pesar, de que en México se cuenta con una legislación amplia en este rubro, no se cumple con la normatividad establecida (SRALA, 2019).

La contaminación en agua por metales pesados es uno de los principales problemas que se deben atender, ya que estos contaminantes generan un fuerte impacto en la salud humana y en los ecosistemas, por lo que existe la necesidad inherente de

disminuir su presencia en los cuerpos hídricos (Reyes y Vergara, 2016, citando por Rivera en 2018).

En la comunidad de Santa Bárbara Almoloya en el municipio de San Pedro Cholula, Puebla, se han presentado problemas referentes a la contaminación de dos cuerpos de agua, el primero es el río Prieto que cruza las laterales de la comunidad y que tiene varias tuberías de descarga de aguas residuales a lo largo de su cauce provenientes del municipio, los hogares y las industrias; y el segundo es el manantial que se encuentra al interior de la Iglesia de Santa Bárbara y que tiene un fuerte significado espiritual en los habitantes, es considerada milagrosa, ya que cura males menores y mayores con solo beber de ella o bañarse dentro de la misma (Águilar-Juárez, 2021).

La población ha informado sobre la posible filtración del agua contaminada en los pozos de los que extraen agua para sus actividades y han reportado olores desagradables que emanan del río y que les provocan dolores de cabeza; sin embargo, por la búsqueda bibliográfica que se ha realizado para la elaboración del presente protocolo y la solicitud de información en el municipio, se ha constatado que no se han realizado estudios referentes al análisis físico-químico y concentración de metales en el río y el manantial.

Por estas razones el objetivo principal de la presente investigación es evaluar la eficiencia de la fitoextracción de metales pesados de aguas del Río Prieto y el manantial de la Iglesia de Santa Bárbara Almoloya, Puebla, buscando un método factible social, económica y políticamente, para contribuir a la reducción de su contaminación.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿El Lirio Acuático y el Vetiver poseen un alto potencial de fitoextracción de metales pesados del agua del Río Prieto de la comunidad de Santa Bárbara Almoloya, San Pedro Cholula?

HIPÓTESIS

El Lirio Acuático y el Vetiver son plantas hiperacumuladoras de metales pesados por lo que removerán estos contaminantes del agua del Río Prieto en la comunidad de Santa Bárbara Almoloya, San Pedro Cholula.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de remoción de metales pesados del Lirio Acuático y Vetiver del agua del Río Prieto de Santa Bárbara Almoloya, Puebla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la calidad del agua del río Prieto y del Manantial de Santa Bárbara Almoloya.
- Evaluar la traslocación de metales pesados extraídos del agua del río Prieto en el lirio acuático y el vetiver.
- Evaluar la eficiencia de remoción de metales pesados del lirio acuático y vetiver.

JUSTIFICACIÓN

La continua ineficiencia del manejo del agua, su administración y falta de conciencia por parte de la sociedad ha conllevado a que muchos de los cuerpos de aguas del

país se encuentren en un estado de sobreexplotación y contaminación elevada; haciendo que el tema de encontrar un método para restaurarlos sea de suma importancia.

Por tal motivo utilizar la fitorremediación (método de aplicación de organismos como plantas para restauración de un ambiente deteriorado por contaminantes de las actividades antropogénicas) para saneamiento de cuerpos de agua es una buena opción que permitirá que pueda ser aplicada en distintas situaciones logrando que el agua pueda restaurarse de manera natural, a costos bajos y logrando el involucramiento de las comunidades.

Es importante mencionar que la idea del uso de esta tecnología como método de purificación de cuerpos de agua ha tomado relevancia en los últimos años, aumentando de manera significativa el interés por el uso de plantas que tienen la capacidad de acumular y tolerar cantidades considerables de metales en los tejidos en diferentes partes de su cuerpo.

También cabe destacar que este proyecto tiene la finalidad de cumplir con 2 de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos en la agenda 2030. El primer objetivo es el número 3 se enfoca en garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos y todas las edades; y el segundo objetivo es el número 6, que busca garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

Aunado a todo lo anterior este proyecto es importante debido al papel fundamental de estos dos cuerpos de agua en la comunidad. Por un lado, el manantial de la iglesia tiene un peso cultural y religioso para la sociedad de Santa Bárbara Almoloya, debido a las propiedades que se cree tiene ese manantial, propiedades que la gente de fe dice ayudan a mejorar a los enfermos. Por el otro lado se encuentra el río Prieto, es cual es un cuerpo de agua que atraviesa la comunidad, pero que debido a la contaminación se han mostrado consecuencias en las aguas subterráneas que están conectadas a los pozos de agua y al sistema de drenaje y

aguas de la escuela de la comunidad, lo cual representa un riesgo considerable que debe de tratarse (Colectivo del periódico el Zenzontle, 2017).

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Estado del Arte

En estos últimos años se han llevado a cabo varias investigaciones con referencia a la eficiencia de fitorremediación como alternativa de saneamiento de cuerpos de agua y suelos contaminados por causas antropogénicas de índole industrial o doméstica, se tienen registros de algunas especies de plantas que han obtenido buenos resultados en la eliminación de compuestos orgánicos, inorgánicos y algunos metales pesados.

En el 2018 Rivera Páez llevó a cabo la evaluación del potencial fitorremediador del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) sobre Aluminio, Cromo y Cobre en la Laguna de Oxidación del Municipio de Jerusalén (Cundinamarca), concluyendo que el uso de Vetiver como removedor de metales pesados de aguas contaminadas es una alternativa viable en el proceso de fitorremediación cuando son utilizados en lagunas de oxidación.

En ese mismo año Collazos Silva estudió la fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando *Eichhornia crassipes*, *Nymphoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*, concluyendo que *Eichhornia crassipes* obtuvo el mayor porcentaje de eficiencia de remoción de contaminantes y DQO y DBO₅.

Finalmente, en 2017 Cuji Quingaluisa llevó a cabo la evaluación del vetiver (*Vetiveria zizanioides*) para la disminución de metales pesados (Cd, Pb) en el canal de riego Latacunga – Salcedo- Ambato en el sector Samanga. Esta investigación permitió mostrar más avances respecto al comportamiento de la especie *Vetiveria zizanioides* ante la presencia de metales pesados como el cadmio y plomo,

concluyendo que demuestra tener una buena tasa de disminución de estos contaminantes por método de absorción.

En México se han llevado a cabo varias investigaciones referentes a la utilización de algunas especies de planta en fitorremediación para la remoción de algunos metales pesados en agua y suelo, teniendo más información de este último compartimento ambiental.

En febrero de 2020 Márquez-Reyes evaluó los efectos sinérgicos de cromo y plomo durante el proceso de fitorremediación con berro (*Nasturtium officinale*) en un humedal artificial, como resultado se obtuvo que la mayor concentración se centraba en las raíces de las plantas siendo más el plomo sobre el cadmio. También se identificó que al incrementarse el Cr (VI) en solución el berro absorbe más metal y una vez que se combina con plomo el índice de tolerancia aumenta mientras que el factor de traslocación disminuye. De igual forma, en el sistema de humedal artificial se observó que el porcentaje de remoción de estos dos metales fue de >99.9% para Pb y 95% para Cr. Se concluyó que existen interacciones ambientales, físicas y químicas que determinan la capacidad de bioacumulación en el berro con respecto a los metales analizados.

En el 2017 López Guel realizó un estudio titulado “Fitorremediación de plomo (Pb^{2+}) en agua por medio de una planta clonal, *Hydrocotyle bonariensis*”. La investigación concluyó que la utilización de *Hydrocotyle bonariensis* posibilitó acoplar un sistema de flujo en agua horizontal en el sistema de fitorremediación construido. De igual forma dio a conocer la importancia de mantener una alta proporción de medio acuoso interactuando casi de manera directa con los tejidos de la planta. El uso de una fuente de recirculación permitió poder minimizar los desechos que contenían Pb^{2+} en el período de pruebas de fitorremediación debido a que no descartaba por completo el efluente una vez usado, si no que optimizó el uso de los recursos sin comprometer los resultados del comportamiento del Pb^{2+} .

Finalmente, en el año 2017 Peña Cabriales publicó un artículo titulado “Contaminación Ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación”, en éste se busca mostrar la situación actual que vive el país respecto a la contaminación de metales pesados y la perspectiva de la utilización de algunas especies de plantas y bacterias como fuente de sanitización de cuerpos de agua contaminados. Se concluyó que las especies con capacidad de acumulación de metales son *Scirpus americanus*, *Typha latifolia*, *Jatropha dioica*, *Eichhornia crassipes* y *Amaranthus hybridus* y que las bacterias con resultados primarios para ser empleados para optimización de procesos de fitorremediación son *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Microbacterium*, *Curtobacterium*, *Rhodococcus*, *Xanthomonas* y *Pseudomonas*.

En el estado de Puebla se han realizado algunos estudios de fitorremediación con vetiver y lirio acuático sobre aguas contaminadas y suelos degradados.

En enero de 2020 Castañeda-Antonio creó un modelo de biorremediación de plomo con lirio acuático donde se enfoca en el estudio de esta planta como bioacumulador en el proceso de biorremediación para la eliminación del plomo (Pb). Los resultados arrojaron que hubo una remoción del 13.05% de plomo del agua de control que poseía una concentración de 3.14 mg/L de este, también el lirio (que contenía inicialmente 0.127 mg/Kg del metal) mostró que al final del experimento terminó con 0.284 mg/Kg indicando que hubo un incremento de la cantidad de plomo del 91.84%, confirmando que el lirio acuático tiene el poder de bioabsorción prometedor dado que puede absorber más de 90 veces su peso en agua.

Por otro lado, en el año 2017 Parra Gallegos investigó acerca de rizofiltración de aguas de riego agrícola contaminados por metales pesados en comunidades del municipio de Atlixco, Puebla. Se concluyó que la rizofiltración es una alternativa a los métodos convencionales de desintoxicación por metales pesados y que el uso de *Eichhornia crassipes* y *Chrysopogon zizanioides* es una opción dado que logró una remoción del 24.5% de los metales presentes en el agua.

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Fuentes de contaminación del agua: Aguas Residuales.

Las primeras formas de contaminación del recurso hídrico fue cuando el hombre pasó del nomadismo al sedentarismo, los recursos comenzaron a ser utilizados de una manera más intensa debido a las concentraciones en núcleos de poblaciones crecientes. El progreso del ser humano conllevó a la creación del comercio, la política, la producción artesanal y obviamente a la generación de desechos.

Posteriormente llegó la era de la suciedad, la Edad Media, donde no había preocupación alguna por el saneamiento, se podía observar que el crecimiento urbano desordenado era un problema significativo lo que provocó que la población optara por la práctica de arrojar los excrementos a las calles y fuera de las murallas que cubrían la ciudad. No había una distinción clara entre las aguas provenientes de los hogares y las que contenían heces fecales de los pozos ciegos (WAWF, 2017).

Las aguas residuales, también conocidas como “aguas servidas” o “efluentes”, pueden y han sido definidas de varias maneras diferentes. Por tanto, no existe una única definición universalmente aceptada para el término (WWAP, 2017, pág. 17).

Una definición más amplia e inclusiva es la que proporciona Raschid-Sally y Jayakody en el informe Sick Water de PNUMA en 2008: “*Las **aguas residuales** se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); aguas de establecimientos comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícola, hortícola y acuícola*”.

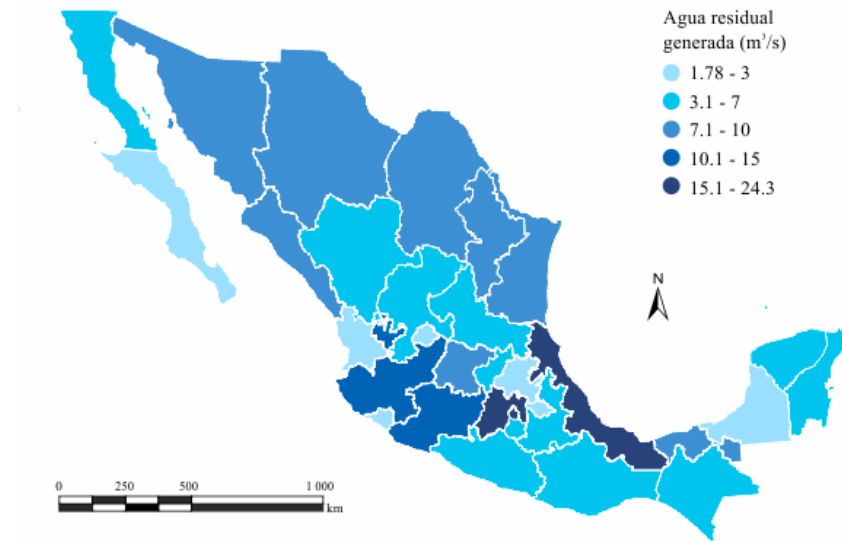
El origen de estas aguas puede provenir de diversas fuentes como Raschid-Sally y Jayakody mencionaron anteriormente, por ello la clasificación de estas aguas podría quedar de la siguiente manera (Pulido *et al.*, s/f):

- Agua Residual Doméstica (ARD).
 - *Aguas negras.*
 - *Aguas grises.*
- Agua Residual Municipal o Urbana (ARU).
- Agua Residual Industrial (ARI).
- Agua Residual Agrícola (ARA).

1.2.2. Problemas con el tratamiento de aguas residuales.

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el informe de Agua 2013-2014 las descargas de aguas residuales ya sean domésticas, industriales, urbanas o agrícolas sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas.

En el 2012 en México los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 km³ de aguas residuales, se puede observar en la Figura 1 que a nivel entidad federativa los estados con las mayores descargas ese mismo año fueron México, Distrito Federal y Veracruz; sumando entre todos el 27.1% del volumen nacional generado (CONAGUA, SEMARNAT, 2013).



Nota:

¹ El caudal generado fue estimado en función de los parámetros: población, suministro de agua, aportación y cobertura.

Figura 1. Mapa de generación de agua residual por entidad federativa en México (CONAGUA, SEMARNAT, 2013).

Es de conocimiento público que a pesar de existir las plantas de tratamiento para aguas residuales y normativas federales muchas veces el agua es retornada a los cuerpos hídricos sin pasar por el proceso pertinente.

Más del 80% de las aguas residuales generadas por las sociedades regresa a los ecosistemas sin haber pasado por tratamiento previo y eso ligado a su mala gestión, tiene un impacto negativo muy significativo sobre la salud, la desnutrición y el medio ambiente. Cada año 1,800 millones de personas están en riesgo de contraer enfermedades como diarrea, cólera, disentería o polio debido al consumo de aguas contaminadas directa o indirectamente (Álvarez, 2017).

Visto desde una perspectiva más profunda los impactos negativos de las aguas residuales no tratadas afectan tres sectores primordiales:

- **Salud Humana:**
 - Aumento de la carga de morbilidad debido a la reducción del agua potable.

- Aumento de la carga de morbilidad debido a alimentos nocivos como pescado contaminado, verduras y otros productos de regadío.
- Aumento del riesgo de morbilidad cuando se trabaja o se juega en un área irrigada por aguas residuales.
- **Medio Ambiente:**
 - Disminución de la biodiversidad.
 - Degradación de ecosistemas acuáticos (eutrofización y zonas muertas).
 - Disminución de oportunidades recreativas.
 - Aumento de emisiones de gases de efecto invernadero.
 - Bioacumulación de toxinas.
- **Economía:**
 - Reducción de la productividad industrial.
 - Reducción de la productividad agrícola.
 - Reducción del valor del mercado de los cultivos cosechados, si se usan aguas residuales peligrosas para el riego.
 - Reducción de captura de peces y mariscos, o reducción del valor del mercado de peces y mariscos.

Además, algo muy significativo de todo esto es que las aguas residuales no tratadas generan una modificación en el ciclo del agua como se puede apreciar en la figura 2:

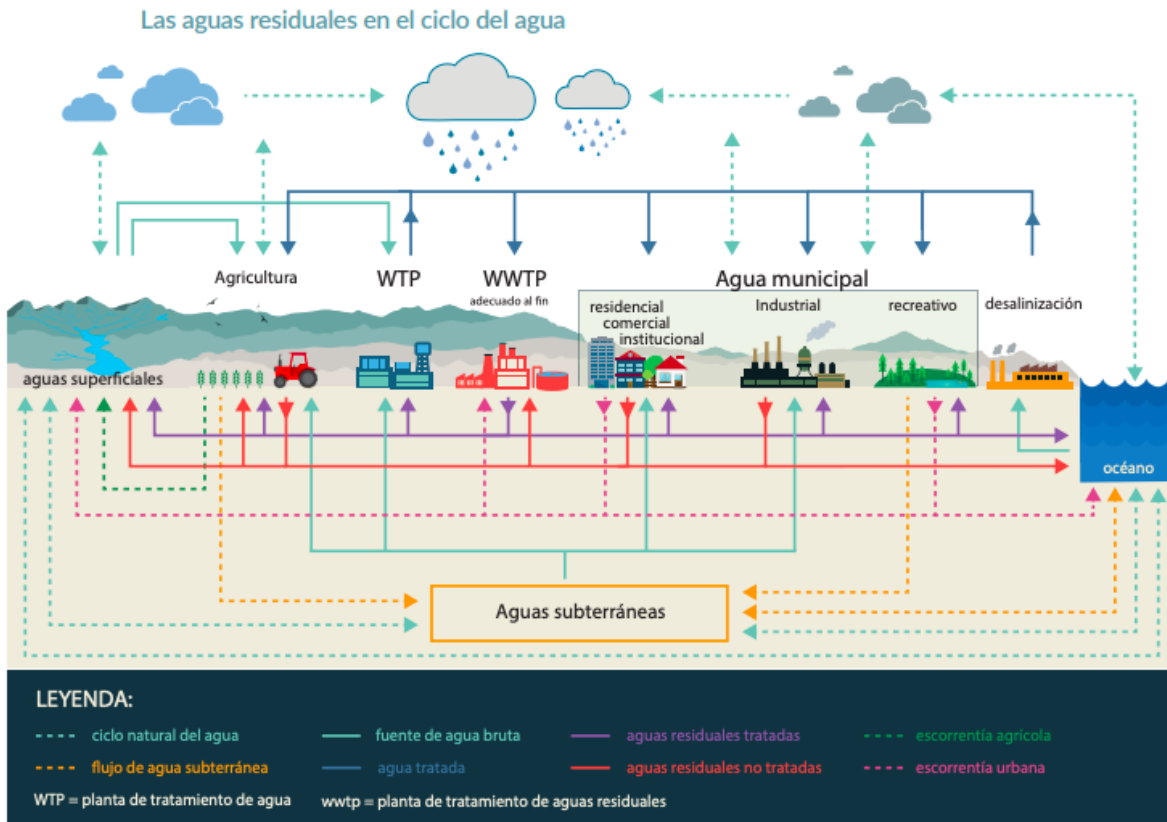


Figura 2. Descripción gráfica de la alteración del ciclo del agua con la presencia de aguas residuales (WWAP, 2010)

Las aguas residuales son un componente crítico del ciclo del agua y deben ser tomadas en cuenta durante todo el ciclo de gestión del agua: desde la captación de agua dulce, el tratamiento, la distribución, el uso, la recolección y el tratamiento posterior hasta su reutilización y retorno final al medio ambiente, donde se repone la fuente para las subsiguientes captaciones de agua. Sin embargo, la mayoría de las veces, la atención que se da a la gestión del agua después de su uso ha sido un componente del ciclo de manejo del agua que a menudo es pasado por alto. La gestión de las aguas residuales generalmente recibe poca atención social y política en comparación con los retos del abastecimiento de agua, especialmente en el contexto de la escasez de esta (WWAP, 2010, pág. 19).

1.3. Metales Pesados

A simple vista la definición de “metales pesados” puede ser sencilla, pero si se profundiza más se puede encontrar que hay una complejidad en su significado y que cada autor tendrá un enfoque determinado específico.

De acuerdo con Peña Cabriales en 2017 los metales pesados se definen como un conjunto de elementos que contienen propiedades metálicas pudiendo incluirse metales de transición, algunos semimetales, lantánidos y actínidos.

Otra definición establece que los metales pesados son un grupo de metales (y metaloides) que poseen una densidad relativamente alta y son tóxicos incluso a niveles de ppb (partes por billón). Entre los más comunes se encuentran el Plomo (Pb), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Mercurio (Hg) y Paladio (Pd). Una diferencia notable entre los contaminantes orgánicos y los metales pesados es que estos últimos no son biodegradables y tiene tendencia a acumularse en los seres vivos (Manavi *et al.*, 2019).

Debido a que son elementos que se caracterizan por su alta densidad, comúnmente se usa una densidad de 5 g/cm^3 para poder definir un metal pesado de uno “ligero”. En otras definiciones se agrega que se requiere de una masa atómica superior a 23 o bien un número atómico superior a 20, aunque estas definiciones pueden ser propensas a tener errores y confundir (Saleh, 2018).

A pesar de ser componentes que se encuentran de manera natural en la corteza terrestre, los metales pesados pueden ser tóxicos para el ser humano, inclusive si se necesitan para mantener algunas funciones esenciales del metabolismo, debido a que en altas concentraciones conduce al envenenamiento. Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse (Gobierno de La Rioja, 2016).

1.3.1. Fuentes Emisoras.

Los metales pesados han sido una parte influyente en el desarrollo de las civilizaciones desde años pasados, pueden encontrarse de manera natural en el ambiente, pero debido al crecimiento de las industrias han tenido un crecimiento y presencia significativa en la vida del ser humano y de los mismos ecosistemas.

En la tabla 1 se presenta las distintas fuentes de emisión natural por parte de algunos metales pesados o minerales metálicos:

Tabla 1. Fuentes naturales emisoras de metales pesados.

Elemento Químico	Fuente Natural
Arsénico	Proviene de arseniuros y arseniatos metálicos, sulfuros minerales como la Arsenopirita, arsenita (As_2O_3), algunos gases volcánicos y fuentes geotérmicas.
Cadmio	Carbonatos y sulfuros minerales de zinc y cobre.
Cobre	Es un metal libre que se encuentra en forma de Cu^0 , también puede provenir de los sulfuros de cobre (CuS_2), de calcopirita (CuFeS_2) o bien de los drenajes de las minas.
Níquel	Se encuentra presente en minerales ferromagnesianos, sulfuros ferrosos, óxido de níquel (NiO), en el hidróxido de níquel ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) o bien en la pentlandita ($(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$).
Plomo	Galena (PbS).
Zinc	Puede encontrarse en minerales como la Blenda o Esfalerita (ZnS), la Willemita (ZnSiO_4), la Calamina (ZnCO_3) o bien de los drenajes que provienen de las minas.

Nota: Fuente Trace Elements in Terrestrial Environments, 2001

Por otro lado, de manera antropogénica cada metal se produce como resultado de diversos procesos. En el caso del plomo, este se libera al ambiente por medio de las extracciones mineras y la quema de combustibles fósiles; además de que también se genera por la fabricación de las baterías, municiones y productos

metálicos (Pabón *et al.*, 2020). La tabla 2 muestra las fuentes antropogénicas que generan como desecho algunos metales pesados.

Tabla 2. Fuentes antropogénicas emisoras de metales pesados.

Elemento	Fuente antropogénica
Cadmio	Es encontrado en baterías recargables de Ni/Cd, fertilizantes fosfatados, detergentes y productos de petróleo refinado, pigmentos y estabilizadores en plástico. También puede deberse a las incineradoras municipales o bien a la refinación del zinc.
Mercurio	Las actividades de extracción de metales preciosos como oro, plata y cobre, igualmente puede generarse por la fundición primaria y secundaria de metales, la producción de carbón y coque y combustión de combustibles y carbón en la generación de electricidad.
Cromo	El cromo puede provenir de los efluentes industriales que son descargados por las industrias químicas o bien, por la construcción de maquinaria e instrumentos de radioelectrónica. También los efluentes de torres de refrigeración de estaciones eléctricas generan cromo en sus desechos.
Cobre	Más común encontrarlo en las tuberías de cobre oxidadas o en las mineras que se dedican a la extracción de este elemento.
Níquel	Se puede generar en los desechos de la minería de metales ferrosos o en la extracción de minerales, aleaciones o aceros. De igual manera los efluentes líquidos de los procesos de recubrimiento generan níquel como desecho.

Nota: Fuente: Artículo Revista MESIDAN. Rodríguez, 2017.

1.3.2. Afectaciones a la salud.

Como parte del avance industrial, el hombre ha llegado a crear procesos para la producción de ciertos artículos que ha propiciado el incremento de metales pesados que se liberan al ambiente y que al final llegan a tener una repercusión en la salud del ser humano.

Debe de entenderse que cada metal y cada elemento químico contaminante posee su propio mecanismo de acción y un sitio en específico en el cual prefirieren almacenarse (Eróstegui, 2009), por tal motivo es lógico que cada metal pesado afecte de manera mutuamente excluyente el cuerpo humano, pero casi siempre conlleva lesiones celulares.

Las vías más comunes de entrada de dichos químicos al organismo del hombre o de los animales es por medio de la dermis, la ingesta y la inhalación. La exposición a algunos metales pesados involucra un efecto adverso sobre la salud llegando incluso a causar cáncer, en otros niveles son nocivos para el cuerpo debido a que el sistema no puede degradar fácilmente este químico de manera biológica y por ende genera afecciones a las funciones metabólicas (Rodríguez, 2017).

Entre los efectos negativos que se han identificados se encuentra el aumento de riesgo de padecer hipertensión arterial, sufrir de una falla renal e incluso tener anemia. Para el caso de las embarazadas, tener una exposición a concentraciones elevadas de estos metales pesados puede derivar en un aborto espontáneo, muerte fetal, parto prematuro y también un peso bajo del bebé al nacer. En infantes se puede llegar a afectar el desarrollo cerebral y atacar el sistema nervioso conduciendo a un coma, convulsiones e inclusive la muerte, en dado caso que el niño sobreviva existe la posibilidad de presentar una gran variedad de secuelas que van desde el retraso mental hasta algún trastorno del comportamiento (AGQ Labs, 2021).

1.3.3. Afectaciones al Medio Ambiente.

Los metales pesados han tenido un incremento relativamente considerable desde que el hombre comenzó a generarlos de manera artificial y sin importarles el tratamiento que debían tener para evitar una afectación hacia el medio ambiente.

La contaminación por metales pesados tanto en agua, suelo y aire constituye una de las problemáticas más severas y urgentes que comprometen la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel local y global (Reyes *et al.*, 2016). En la figura 3 se puede observar un esquema que muestra el ciclo infinito que se genera al no procesar adecuadamente las descargas provenientes de las diferentes industrias antes que de lleguen a los ríos, estas aguas contaminantes infectan toda la vida acuática presente conllevando a problemas más serios.

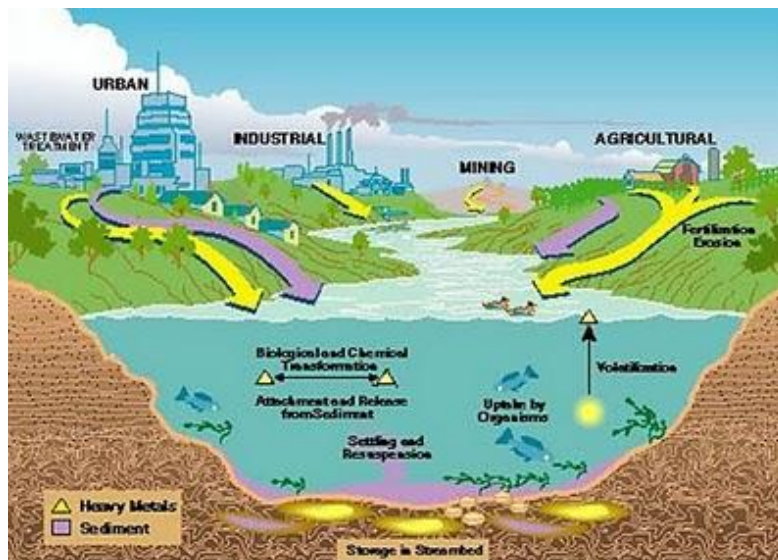


Figura 3. Ciclo de contaminación en cuerpos de agua por metales pesados provenientes de diversos procesos antropogénicos (Elm, 2015).

Por otra parte se tiene la problemática de la contaminación de las fuentes hídricas de todo el mundo debido a estos elementos tóxicos, esto, debido a las descargas industriales de los diferentes procesos de producción en los cuales son utilizados diversos compuestos que terminan infectando las aguas de los ríos, lo que genera un efectos domino debido a las implicaciones sobre las funciones reguladores y de soporte que poseen los ríos en un medio ecosistémico y sobre la cadena trófica (Pabón *et al.*, 2020).

En México uno de los lugares que se ha visto afectado en mayor magnitud es la laguna La Zacateca que se encuentra ubicada en el municipio de Guadalupe en el estado de Zacatecas. Desde la época virreinal hasta 1900 se depositaron en las desembocaduras de los ríos los restos de los procesos de amalgación de plata los cuales contenían plomo, arsénico y mercurio. Con el tiempo se acumularon en la laguna que durante una época del año se deseca y es utilizada para la agricultura, representado así un vector de contaminación de alto riesgo (Covarrubias y Peña, 2017).

1.4. Marco Legal

La normativa es muy importante porque determinará las dificultades o facilidades que se presente en la elaboración de un trabajo de este estilo y en general en cualquier obra que se realice dentro de las áreas limítrofes de una ciudad, estado o país.

La investigación consta de varias etapas en las que se requiere que algunos pasos cumplan lo que se estipula en las legislaciones mexicanas.

De acuerdo con la norma mexicana es necesario seguir un protocolo establecido para la toma de muestras de aguas residuales, la **NMX-AA-003-1980** establece los parámetros y lineamientos que se deben de seguir para la recolección óptima de las muestras de aguas residuales. Esto es fundamental para evitar que las muestras se contaminen o se vean afectados por agente externos, por lo que es necesario mantenerlas en botes de cierre hermético y con previa etiquetación para su identificación.

En la etapa de análisis de las muestras, es necesario llevar a cabo el estudio de ciertos parámetros que permitan la óptima evaluación de la calidad del agua. En este caso es indispensable seguir lo establecido en las siguientes normativas:

- **NOM-067-ECOL-1994:** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal.
- **NMX-AA-051-SCFI-2001:** Determinación de metales pesados mediante espectrofotométrico de absorción atómica.
- **NMX-AA-008-SCFI-2016:** Tiene el objetivo de determinar el método de prueba para el análisis del pH de aguas naturales, residuales y residuales tratadas en el intervalo de pH 0 a pH 14 y en un intervalo de temperatura de 0°C a 50°C (DOF, 2016).
- **NMX-AA-093-SCFI-2000:** Esta norma establece el método de prueba para la determinación de la conductividad electrolítica en agua y es aplicada para agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 2000, pág. 2).
- **NOM-001-SEMARNAT-2021:** Establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Esta norma fue modificada recientemente e incluye las nuevas concentraciones de metales pesados permisibles.
- **NMX-AA-028-SCFI-2001:** Esta norma busca establecer el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (Secretaría de Economía, 2001, pág. 1).

CAPÍTULO 2. FITORREMEDIACIÓN

2.1. Fitorremediación

La biorremediación es una de las tecnologías con mayor potencial para llegar a la meta de la sostenibilidad. Es entendida como la aplicación de organismos (hongos,

plantas o enzimas derivados de ellos) para la restauración del ambiente (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2017, pág. 312).

La fitorremediación (Figura 4) hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos e incluso aire. Se compone de dos palabras: *fito/fita*, que en griego significa “planta o vegetal”; y *remediare* que en latín significa “poner remedio al daño, o corregir o enmendar algo” (Núñez *et al.*, 2004, pág. 69).

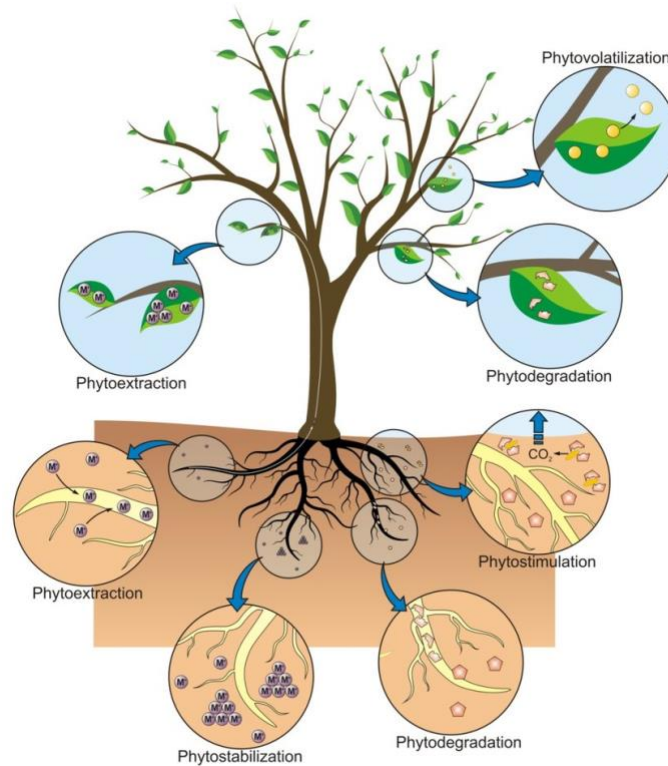


Figura 4. Proceso de fitorremediación dividido en las 6 subcategorías que pueden llevarse a cabo por una planta (Favas *et al.*, 2014).

Una característica importante y que más resalta este tipo de método de tratamiento de agua es que la fitorremediación tiene la capacidad de absorber, acumular, metabolizar o estabilizar los contaminantes presentes en el agua, suelo o aire como son los metales pesados, compuestos derivados del petróleo o bien los compuestos orgánicos y/o inorgánicos (Delgadillo-López *et al.*, 2011, pág. 597).

A lo largo de los años se han podido ir categorizando las diferentes maneras en las que trabajan las plantas bajo ciertos criterios que se presenten en las aguas contaminadas. La clasificación sirvió para determinar específicamente que tipo de planta podía eliminar o mitigar cierto tipo de contaminantes. Por tal motivo se decidió clasificar de acuerdo con su propósito, las que fungían como medio de contención y como medio de eliminación. Dentro de estas dos categorías se subdividieron según el funcionamiento de la planta (Thangavel y Subhuram, 2004):

- **Medio de contención:**
 - Rizofiltración.
 - Fitoestabilización.
 - Fitoimmobilización.
- **Medio de eliminación:**
 - Fitodegradación.
 - Fitoextracción.
 - Fitovolatilización.

Aunado a todo lo anterior mencionado, es indispensable conocer los beneficios y limitaciones que tiene este tipo de tratamiento de agua debido a las implicaciones que conlleva la utilización de plantas vasculares acuáticas, es importante siempre mantener un balance en el ecosistema que se está llevando a cabo para no generar una plaga que afecte a las especies nativas de la zona.

Entre las ventajas de la fitorremediación es que se considera una tecnología sustentable dado que no requiere de una construcción tan agresiva en comparación con una planta de tratamiento de agua tradicional, también se han obtenido buenos resultados que indican un alta eficiencia en el tratamiento de varios tipos de contaminantes de manera in situ; además cuenta con la versatilidad potencialmente alta para poder tratar un gama muy amplia de materiales peligrosos como son los metales pesados (Polprasert, 1996; Brooks, 1998; Raskin y Ensley, 2000; citado por Núñez *et al.*, 2004).

Farraji *et al.* en 2016 establecieron que otra de las ventajas que posee la utilización de la fitorremediación es su alta evaluación costo – beneficio a pesar de las

variables que deben de considerarse en su análisis, ellos basaron su investigación en un reporte realizado por Mulbry y Kondrad en 2008 en el cual se determinó que la fitorremediación de nutrientes en aguas residuales de lácteos estaba muy por debajo del método de tratamiento tradicional (11 USD por Kg de Nitrógeno).

Otra característica a favor de esta tecnología es que las plantas pueden crecer con facilidad sin la necesidad de un monitoreo constante que requiera la presencia de mucho personal y que al mismo tiempo generan un paisaje agradable a la vista de la población y sus visitantes (Sasy, 2011).

Desgraciadamente, aunque en primera instancia la fitorremediación es una alternativa viable, por ser de reciente implementación aún existen ciertas limitantes que deben de ser un punto importante que considerar. Una de ellas es el tiempo, por el hecho de utilizar plantas en el proceso de remediación el lapso para que llegue a limpiar un residuo peligroso por completo es largo (varios años o más) y en ocasiones puede la contaminación no se elimine por completo (Vidali, 2001; Rajakaruna et al., 2006; citado por Moosavi y Seghatoleslami, 2013).

Otros autores como Segretin *et al.* en 2010 estipulan que la fitotoxicidad presente en el agua o en el suelo puede restringir el crecimiento de las plantas cuando se encuentran en zonas de alta contaminación; además que la contaminación potencial de las cadenas alimentarias y de las napas de agua son factores peligrosos que se deben de tener en cuenta al momento de su aplicación.

2.2. Métodos de fitorremediación para el saneamiento de los cuerpos de agua en el proyecto de investigación.

La investigación se centra en la evaluación de la eficiencia de 2 tipos de plantas en el proceso de remoción de metales pesados y compuestos orgánicos e inorgánicos mediante la utilización de la fitoextracción y la fitodegradación.

La fitodegradación (Figura 5) es el proceso las plantas metabolizan y destruyen los contaminantes con tejidos vegetales (CPEO, s/f). Dicha degradación se logra gracias a la liberación de enzimas desde las raíces, en el caso de contaminantes orgánicos son procesados por los tejidos vegetales para metabolizarlos en sustancias menos tóxicas (Greipsson, 2011).

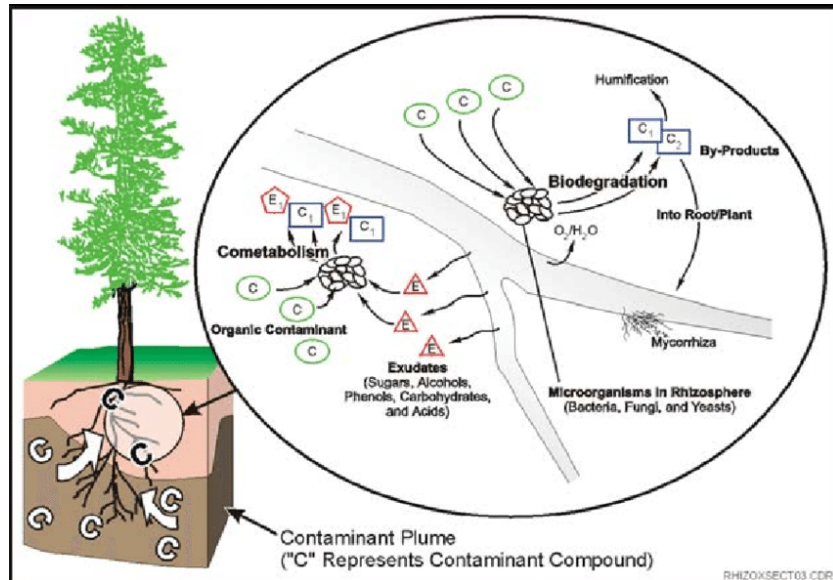


Figura 5. Proceso de fitodegradación de la planta a nivel microscópico (ITCR, 2001, citado por Longley, 2007).

Por otro lado, la fitoextracción (Figura 6), también es conocida como fitoacumulación debido a que las raíces de las plantas absorben los contaminantes junto con otros nutrientes y agua. La masa contaminante no es destruida, sino que termina en los brotes y hojas de las plantas. Este método es utilizado principalmente para desechos que contienen metales pesados (CPEO, s/f).

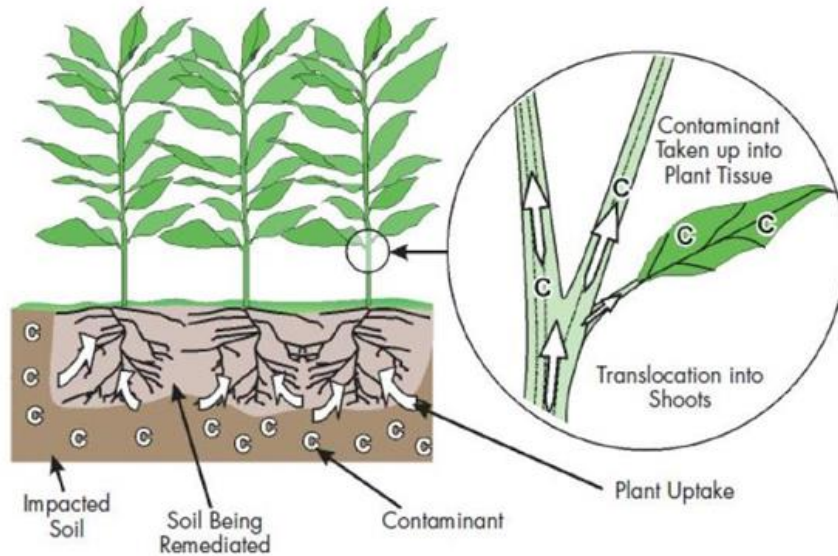


Figura 6. Proceso de fitoextracción donde se muestra el comportamiento del contaminante una vez es adquirido por la planta (ITCR, 2001; citado por Longley, 2007).

2.3. Utilización de plantas en el proceso de fitorremediación.

El propósito principal es el analizar la efectividad de las dos especies de plantas en el proceso de remoción de metales pesado y compuestos orgánicos e inorgánicos en el Río Prieto y el manantial de Santa Bárbara Almoloya con los métodos de fitoextracción y fitodegradación.

Se tiene contemplado la utilización del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*) y Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para ser los encargados del saneamiento de los dos cuerpos de agua.

2.3.1. Lirio Acuático.

El lirio acuático (Figura 7) es una planta acuática libremente flotadora o bien que se fija al sustrato, pertenece a la clase de las monocotiledóneas del orden de los Liliales. Su tamaño puede ser muy variable y dependerá de las condiciones climáticas en las que se encuentre, pero normalmente miden alrededor de 30 cm formando matas flotantes grandes (Hanan *et al.*, 2009).



Figura 7. Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes* (Tenorio, 2005).

2.3.1.1. Morfología.

En cuanto a sus partes (Figura 8), su tallo consiste en un solo eje cilíndrico que tiene internodos cortos en los cuales se producen todas las raíces, hojas, renuevo e inflorescencias de la planta, qué, en condiciones abiertas, se producen largos y horizontales, cortos y verticales en tapetes densos. Las elongaciones del tallo reciben el nombre de estolones cuando son superficiales y envían a la parte inferior las raíces adventicias, lo que conlleva a la producción de nuevos tallos erectos a intervalos (Díaz Zavaleta *et al.*, 1989).

Las hojas son de una tonalidad verde brillante con flores que van de un color azul a uno violeta y que en raras ocasiones pueden llegar a ser blancas, las láminas de las hojas son casi circulares más anchas que largas van de un tamaño de 2.5 cm a 16 cm de largo y de 3 a 12 cm de ancho (Salazar Estrella, 2015).

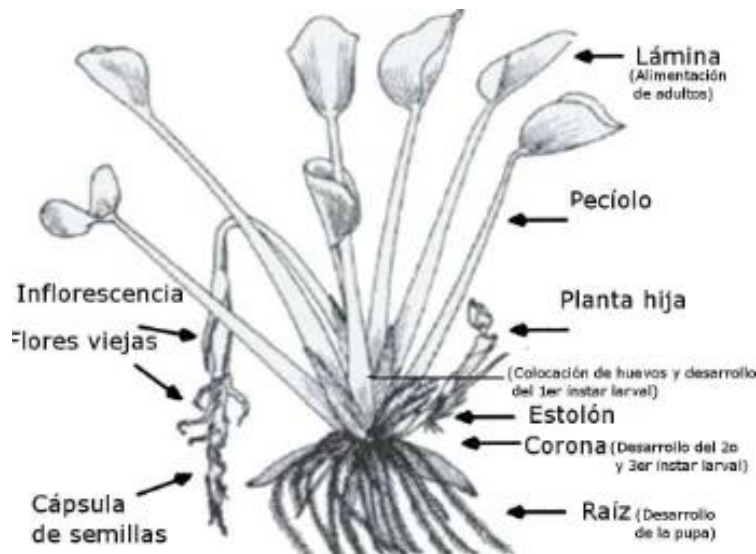


Figura 8. Morfología del lirio acuático (Martínez Morales, 2011).

Las raíces son fibrosas y poseen una considerable cantidad de pequeñas hebras que tienen como función el captar nutrientes (como en una especie de red) y también algunas partículas suspendidas, dicha característica explican la alta tasa de crecimiento (Lindsey y Hirt, 2000, citado por Juárez, 2011)

Los pecíolos son muy esponjosos y rellenos de aire, conocido como aerénquimas, y son los encargados de que la planta pueda flotar sobre el agua (Juárez, 2011).

2.3.1.2. Reproducción.

Es una de las especies más estudiadas debido a sus características depuradoras y su facilidad de proliferación y adaptación a climas tropicales y subtropicales (Porrás, 2017, pág. 7), aunque se ha detectado que los climas fríos pueden afectar considerablemente su crecimiento durante la época de invierno (Díaz Zavaleta *et al.*, 1989).

Una característica considerable es la alta tolerancia que posee en las variaciones de las concentraciones de nutrientes, en la temperatura y en los niveles del potencial de hidrógeno; de hecho, el rango óptimo para el desarrollo del lirio acuático de este

último va de 6 a 8. Puede crecer en a una temperatura desde 1°C hasta los 40°C, aunque presenta cierta sensibilidad cuando las temperaturas son inferiores a 1°C, se detectó que el rango ideal para ser adecuado desarrollo y crecimiento se da a temperaturas de entre 25 y 27.5°C (Malik, 2007; citado por Rodríguez *et al.*, 2021) pero cuando se presenta un incremento mayor a 33°C se reduce la tasa de reproducción (Gakwavu *et al.*, 2012; citado por Rodríguez *et al.*, 2021). También cabe mencionar que cuando existe presencia de concentraciones altas en la salinidad del agua (6 a 8%) genera un efecto inhibitorio en el crecimiento de la planta, además que una baja humedad relativa del aire, entre 15 y 40%, se convierte también en un factor limitante de su crecimiento (Rodríguez *et al.*, 2021).

El lirio puede establecerse en aguas donde las condiciones no sean las ideales debido a las asociaciones microbianas que se presentan en la rizosfera, y mientras más eutrófico sea el ambiente, la tasa de éxito de propagación será mayor (Miranda y Lot, 1999).

2.3.1.3. *Potencial fitorremediador.*

Se ha descubierto que tiene capacidades de limpiar ambientes contaminados y que por consiguiente puede acumular y/o transformar sustancias tóxicas presentes en el suelo o el agua (Porras, 2017, pág. 9).

De acuerdo con Roldán y Álvarez en 2002 (citado por Arroyave en 2004 y Porras en 2017) en canales sembrados con lirio acuático se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanzan más de 97% en metales pesados y hasta 98% en sólidos suspendidos.

2.3.2. *Vetiver.*

El *Chrysopogon zizanioides* o mejor conocido como Vetiver o Pasto Vetiver (Figura 9), es una planta que proviene de los pantanos de la India. Está catalogada como hidrófita o como xerófila puesto que una vez que se encuentra establecida en una

zona puede llegar a resistir sequías, inundaciones y prolongados períodos de anegamiento.



Figura 9. Vetiver adulto, muestra el largo que puede llegar a tener la raíz y la hoja (Andrade, s/f).

2.3.2.1. Morfología.

Tiene raíces fuertes y aromáticas que constituyen una red masiva de raíces fibrosas en cuando se encuentran bajo condiciones favorables alcanzan a crecer hasta 3 metros en el primer año, los culmos son robustos y miden desde 1 a 2.5 metros de altura, las vainas de las hojas son glabras (no presentan pelos, tricomas o estructuras similares en la superficie externa, en otras palabras, lampiños), inferiores aquilladas e imbricadas en racimos que forman una especie de abanico. Sus laminas son foliares lineales de un tono verde pálido con textura rígida que van de los 30 hasta los 90 centímetros con una anchura de 0.5 a 1 cm. Los racimos son delgados con aproximadamente 5 a 13 pares de espiguillas (con una dimensión de 4 a 5 mm) y una tríada terminal (Rojas-Sandoval, 2020).

Esta especie se caracteriza por tener atributos particulares en su morfología y debido a su origen tropical su desarrollo óptimo se da cuando se encuentra en lugares donde la temperatura varía entre 20 y 30°C; pudiendo tolerar incluso temperaturas aéreas que van de los -15°C hasta los 40°C (Rivera, 2018).

Igualmente tiene la característica de ser resistente a zonas con un rango de salinidad desde moderada hasta muy salino (4 – 16 dS/m), altos contenidos de sodio (PSI \geq 33%), alta alcalinidad (pH \geq 9.6), alta acidez (pH \leq 3.8) y también altos contenidos de aluminio (% Sat. Al $>$ 68%) (Andrade, s/f).

2.3.2.2. *Crecimiento y Reproducción.*

Se propaga por medio de semillas y vegetativamente dividiendo matas. En los cultivos se da la propagación cuando se separan las matas de manera manual en parte que consisten en unos pocos brotes de entre 15 y 20 centímetros de largo que tengan una parte de las raíces para que puedan replantarse en otro sitio (Guzmán y Oyen, 1999, Truong *et al.*, 2008, citado por Rojas-Sandoval, 2020).

Su crecimiento y desarrollo es más rápido cuando se encuentra en zonas de climas cálidos si por el contrario es un clima frío, dicho crecimiento se verá ralentizado. En cuanto a la humedad puede ser utilizado en condiciones áridas (300mm) pero es preferible que ésta sea de 70 mm en adelante (Miranda Muñoz, 2016, pág. 52).

2.3.2.3. *Potencial fitorremediador.*

Las investigaciones realizadas con referencia a la utilización del Vetiver han demostrado que tiene una capacidad extraordinaria para soportar condiciones ambientales extremas como altos niveles de sal, acidez, alcalinidad y sodicidad (la acumulación de sales con un elevado contenido del ion sodio (Na⁺)), así como una amplia gama de metales pesados y nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P) (Mathew *et al.*, 2016, citado por Rivera en 2018).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1. San Pedro Cholula

Es uno de los municipios que se encuentra en la parte centro este del estado de Puebla, el cual colinda con los municipios de Juan C. Bonilla, Coronango y Cuautlancingo en la zona norte, al sur con San Gregorio Atzompa y San Andrés Cholula, por la parte este colinda con la Ciudad de Puebla y al oeste con los municipios de San Jerónimo Tecaunipan y Calpan (Figura 10). Tiene una superficie territorial de 76.32 kilómetros cuadrados (INEGI, 1994).

3.1.1. Hidrografía.

Este municipio se encuentra dentro de la parte occidental de la cuenca alta del Río Atoyac, el cual nace en la vertiente oriental de la sierra Nevada.

En la zona oriente es atravesado por el río Ametlapanapa, el cual recorre gran parte del municipio y una vez que sale se incorpora de al Atoyac, aunque no desemboca como tal en él. También tiene colindancia con el río Rabanillo en la parte noroeste, él cual cuanta con algunos manantiales menos conocidos y es un afluente del río Atoyac (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2005).

3.1.2. Clima.

Debido a su ubicación geográfica en el estado de Puebla, está dentro de las zonas de climas templados, por tal motivo presenta clima de tipo **Templado subhúmedo C(w₂)**, el cual se caracteriza por tener lluvias en verano de mayor humedad.

La temporada de lluvia es nublada mientras que la temporada de seca es considerada parcialmente nublada, por lo que resulta ser cómodo durante todo el año. A lo largo de los 12 meses del año la temperatura varía entre 1°C y 24°C y en

muy pocas ocasiones llega a estar por debajo de los 0°C o bien rebasar los 27°C (Weather Spark, 2016).

3.1.3. Precipitación.

El conocimiento de la cantidad de agua que se acumula debido a las precipitaciones es un factor importante que considerar y más que nada porque en ciertas ocasiones el exceso de agua que proviene de la lluvia puede desencadenar afectaciones como son los desbordamientos de ríos. En la temporada húmeda son frecuentes los ciclones tropicales, las lluvias intensas y las altas temperaturas (Figura 11) (Jáuregui, 1995, citado por Matías et al., 2007).

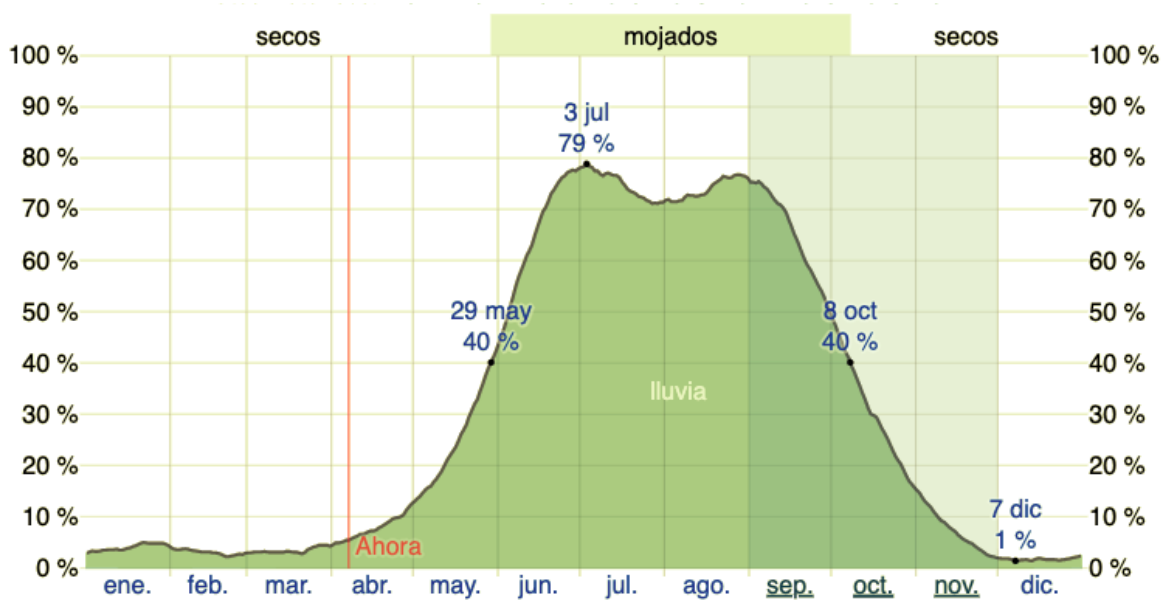


Figura 10. Gráfico de probabilidad diaria de precipitación anual en el municipio de San Pedro Cholula (Weather Spark, 2021).

En el municipio de San Pedro Cholula la temporada con mayor precipitación tiene una duración aproximada de 4.3 meses con una probabilidad superior al 40% de que algún día resulte ser más mojado. Julio es el mes con el mayor número de días mojados (23.1 días) con un promedio mínimo de 1 mm de precipitación (Weather Spark, 2016).

3.2. Junta Auxiliar de Santa Bárbara Almoloya.

La zona de estudio de este proyecto se encuentra ubicado en una de las subdivisiones administrativas del municipio de San Pedro Cholula, la junta auxiliar de Santa Bárbara Almoloya, que también está dentro de la localidad de Cholula de Rivadavia. Esta junta auxiliar se encuentra en la zona noreste del municipio (Figura 12), presenta casi las mismas condiciones hidrológicas y climatológicas que San Pedro Cholula, aunque pueden presentarse variaciones en el clima y uso de suelo.

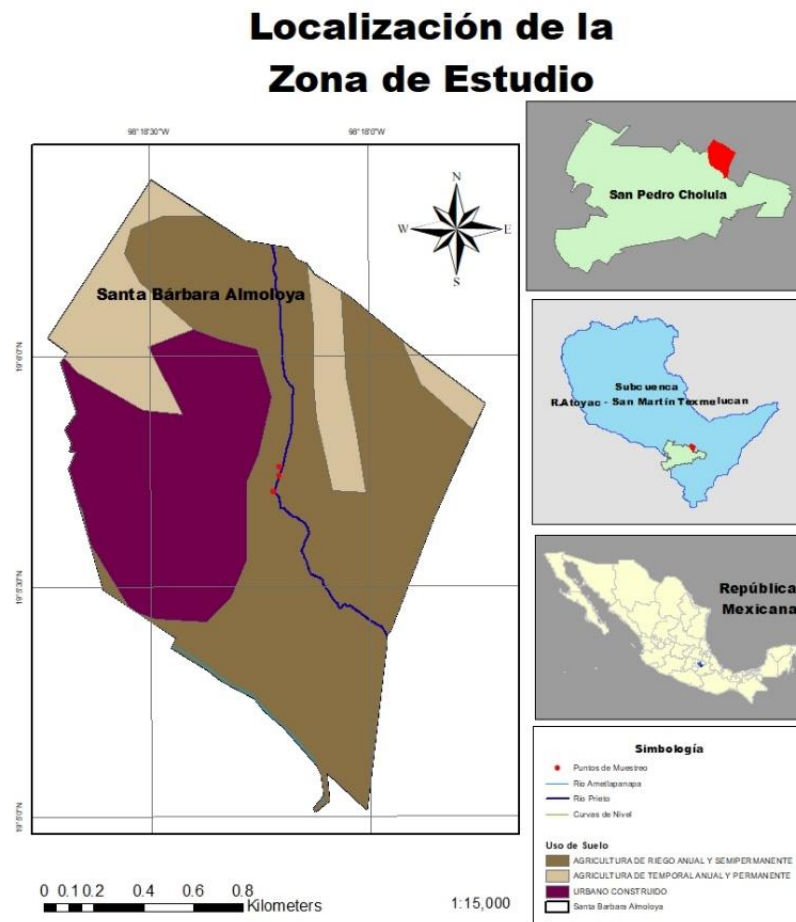


Figura 11. Mapa de la zona de estudio con los puntos de muestro del río (Elaboración propia).

3.2.1. Hidrología.

Uno de los cuerpos de agua que se encuentra en la región hidrológica 18 Ad Atoyac - San Martín Texmelucan, la cual abarca el 92.4% de la superficie municipal, (Figura

13) es el Río Prieto (INEGI, 1994). Este río fue seleccionado para ser estudiado y analizado debido a la exposición que presenta por las descargas de aguas municipales y domésticas no tratadas y por industrias.

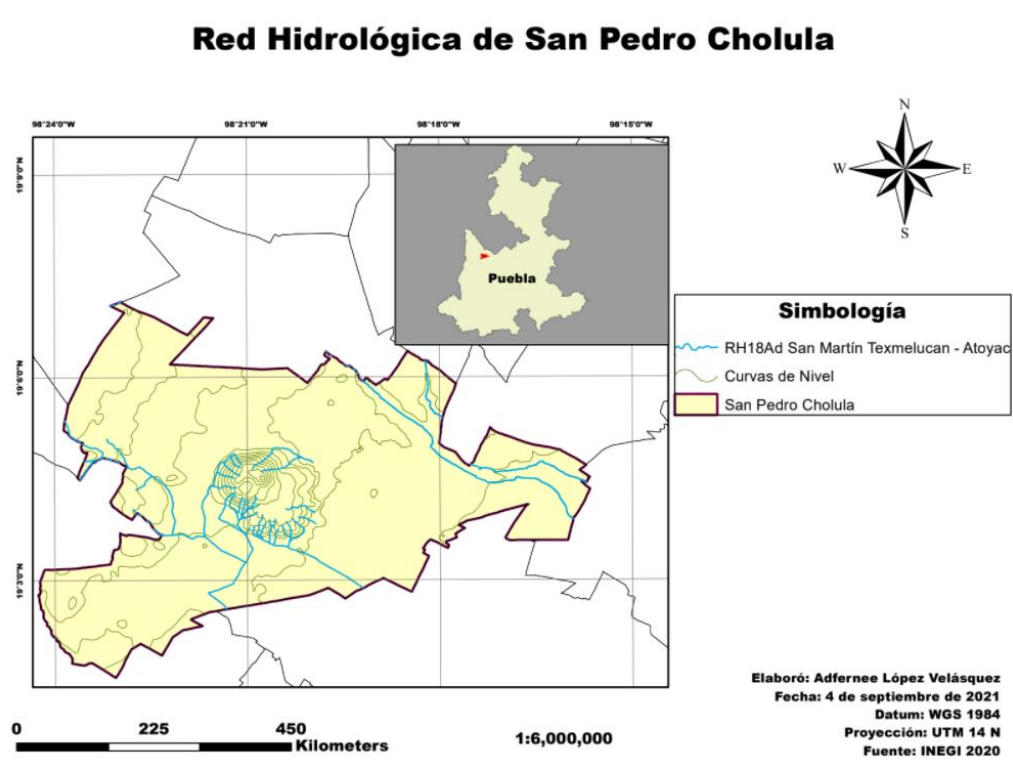


Figura 12. Mapa de hidrología de las regiones hidrológicas de San Pedro Cholula (Elaboración propia).

3.3. Zona de Implementación de Proyecto Experimental

3.3.1. Cuautlancingo.

Su nombre tiene origen en raíces nahuas y significa “en el pequeño bosque” o “águila que se posa para tomar agua”. La figura 14 muestra que se encuentra ubicado en la zona centro oeste de Puebla y tiene colindancia al Norte con el estado de Tlaxcala, al Sur con San Pedro Cholula y la ciudad de Puebla; en la parte Este limita con el municipio de Tlaxcala y la ciudad de Puebla y al Oeste con Conorango (Auditoría Superior del Estado de Puebla [ASEP], 2019).

Mapa de Cuautlancingo Zona de Experimentación

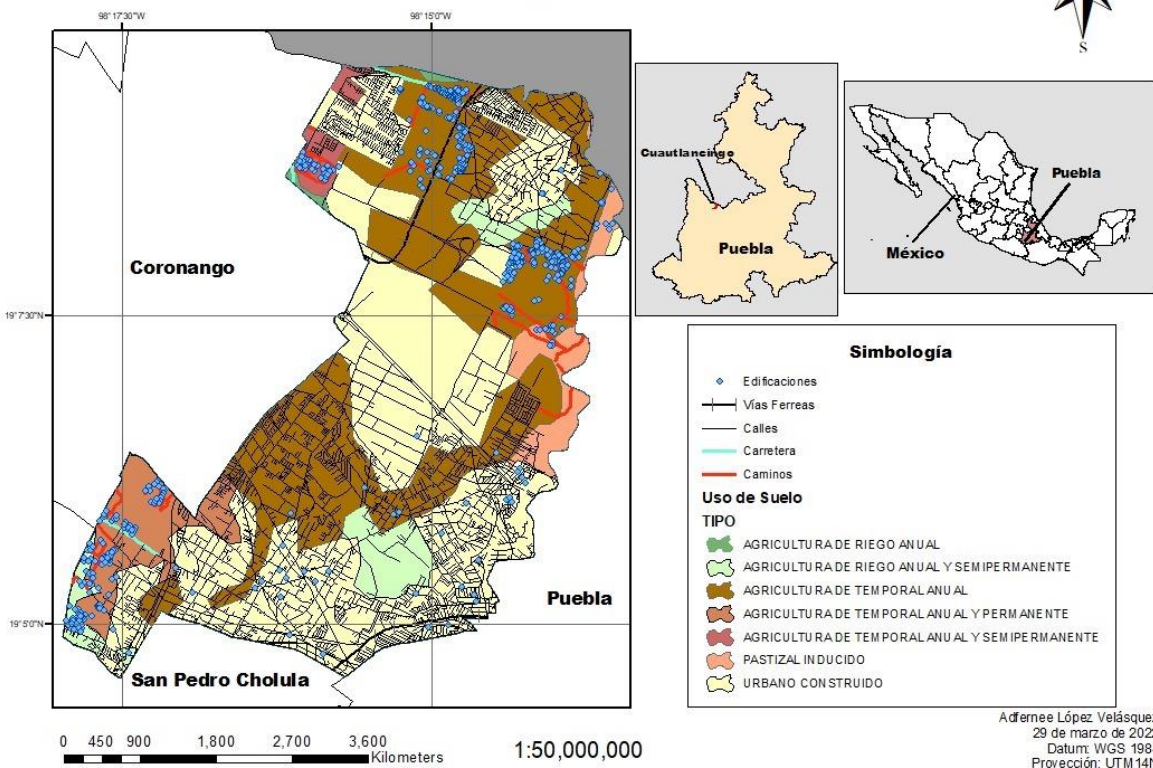


Figura 13. Mapa del municipio de Cuautlancingo (Elaboración propia).

Cuenta con una superficie territorial de 38.17 kilómetros cuadrados y es el municipio número 191 del estado de Puebla (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFE], 2019). Cuautlancingo cuenta con 2 parques industriales de mucho peso y un microparque industrial, es una zona con bastante afluencia en que los últimos años ha ido incrementando de población, para 2020 se contaba con una población total de 137,435 habitantes que rondaban entre los 35 y 39 años en su mayoría (DataMéxico, 2020).

Es importante hacer mención de este municipio y sus características debido a que la parte experimental de este proyecto se llevo a cabo dentro de las inmediaciones de mi domicilio, el cual se encuentra ubicado en esta zona, y que

presenta condiciones diferentes a las del lugar de donde provienen las plantas y el agua del río Prieto.

3.3.1.1. Hidrología.

Al igual que la Junta Auxiliar de Santa Bárbara Almoloya, el municipio de Cuautlancingo se encuentra dentro de la región hidrológica RH18Ad Atoyac – San Martín Texmelucan, además de que es parte de la zona central de la cuenca alta del río Atoyac (Figura 15).

El oriente del municipio se ve bañado por el río Atoyac, el cual cruza más de 8 kilómetros en su recorrido fungiendo como límite entre el estado de Tlaxcala y Puebla, además de que por el extremo suroeste atraviesa una parte pequeña del río Prieto (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFE], 2019).

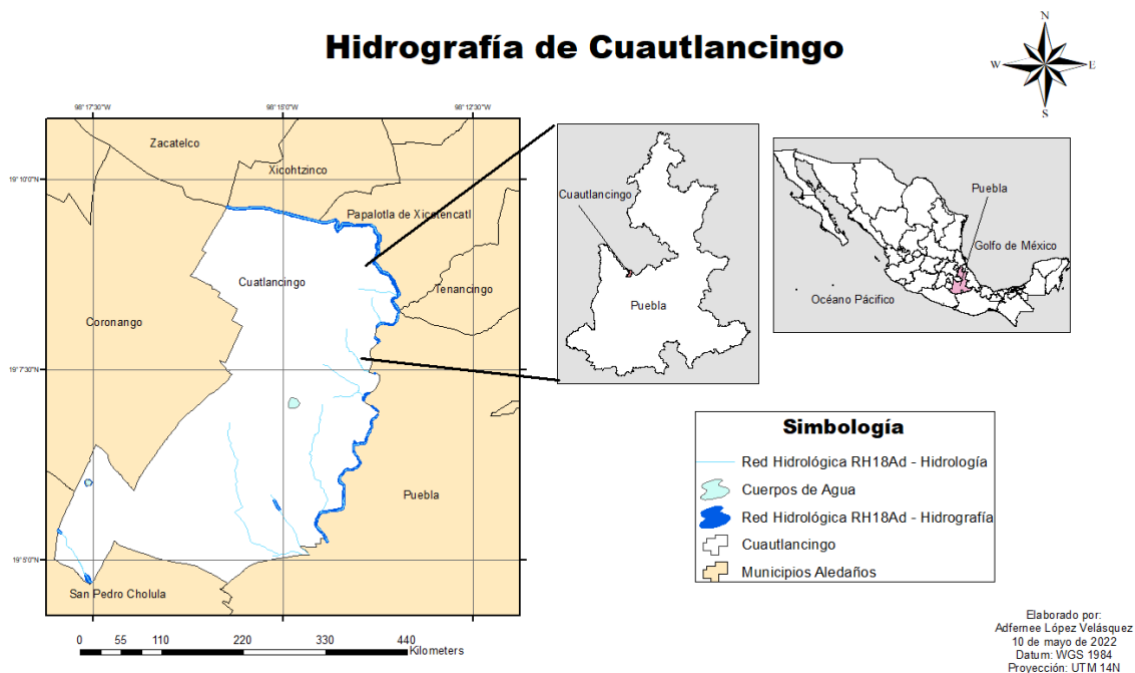


Figura 14. Mapa hidrográfico del municipio de Cuautlancingo (Elaboración propia).

3.3.1.2. *Clima.*

Al igual que San Pedro Cholula, el municipio de San Juan B. Cuatlancingo está dentro de la zona de climas templados del Valle de Puebla por lo que su clima es de tipo templado subhúmedo (**C(w₂)**) presentando lluvias durante el verano.

La temperatura media anual que alcanza varía desde los 12°C a los 18°C, teniendo una temperatura mínima de -3°C en la temporada más fría (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFE], 2019). Puede alcanzar los 26°C y en temporada de seca subir a 29°C pero rara vez rebasarlo, la temporada templada tiene una duración aproximada de 2.4 meses y la temperatura máxima que se alcanza es de 25°C (Weather Spark, 2016).

3.3.1.3. *Precipitación.*

La temporada de lluvia se extiende por casi cinco meses en donde se tiene una probabilidad de más del 39% de que un día del mes sea el más mojado, aproximadamente los días con más lluvia son de 21.6 días en el mes de julio llegando a tener como mínimo 1 milímetro de precipitación con dos distinciones: solo lluvia, solo nieve o una combinación de ambas. Es común tener solamente lluvia durante el año contando con una probabilidad máxima de que se presente del 76% (Figura 16) (Weather Spark, 2016).

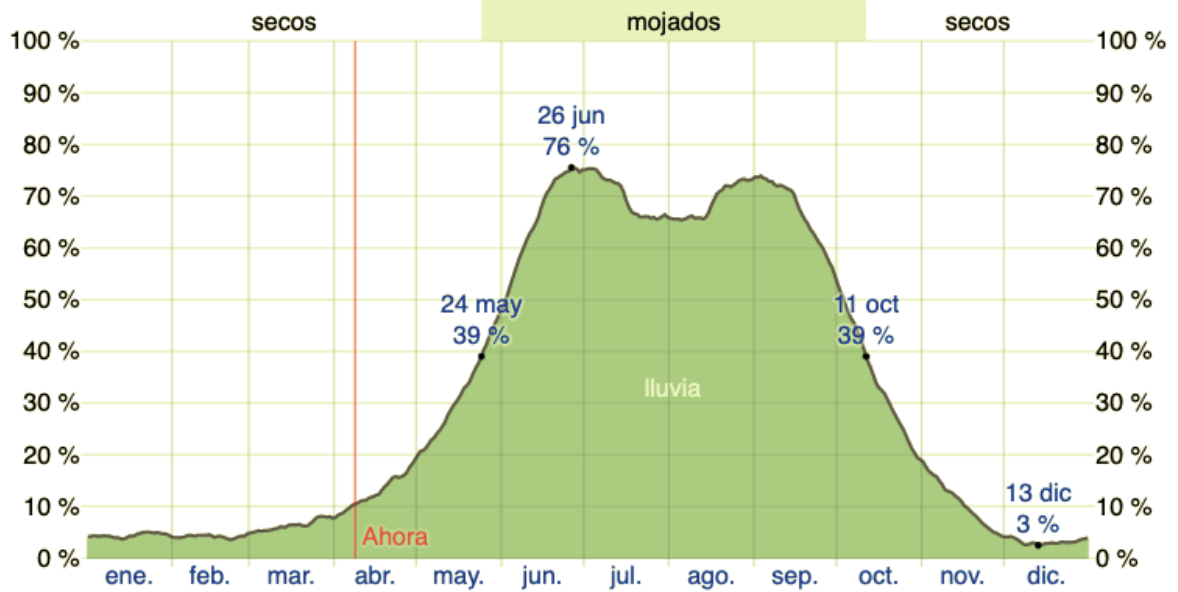


Figura 15. Gráfico de probabilidad de precipitación en el municipio de Cuautlancingo durante un año (Weather Spark, 2021).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Fases Metodológicas

La metodología se diseñó con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados, se dividió en cinco fases: Gabinete, Campo, Laboratorio, Fitoextracción e Integración (Figura 16).

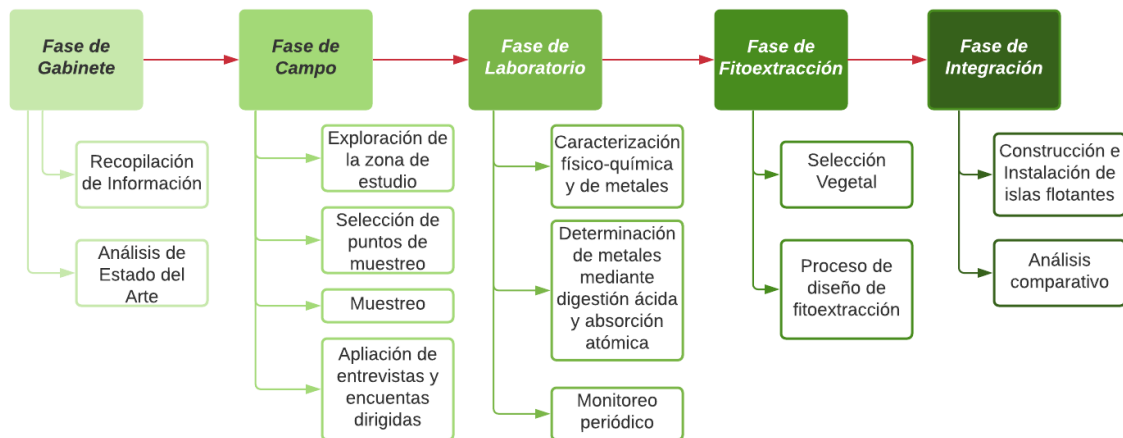


Figura 16. Diagrama de metodología dividido por fases de aplicación en el proyecto (Elaboración propia).

4.1.1. Fase de Gabinete.

Esta etapa incluye la recopilación de la información y el análisis del estado del arte del tema de investigación, lo que involucra literatura gris como tesis de grado y posgrado, y especializada como artículos científicos y revisiones. De igual forma, se obtuvo la información de la caracterización biofísica y socioeconómica de la zona de estudio a través de las bases de datos de CONAPO, CENEVAL, CONAGUA, SEMARNAT y el Ayuntamiento Municipal. De la plataforma del INEGI se descargaron los mapas temáticos y vectoriales de la zona de estudio para identificar la fisiografía, clima, hidrología, vegetación, geología y edafología. Se creó una base de datos con la información relevante para ser empleada en la fase de integración. Esta parte de recopilación de información se realizó durante todo el proyecto de investigación.

4.1.2. Fase de Campo.

Esta fase se subdivide en cuatro actividades primordiales que permiten contextualizar un poco más en la situación de la problemática del río Prieto en la Junta Auxiliar de Santa Bárbara Almoloya.

1. Exploración de la zona de estudio.

Esta etapa se inició con salidas de reconocimiento a la zona de estudio para identificar la problemática y viabilidad del proyecto; permitiendo la vinculación con las autoridades correspondientes con la finalidad de solicitar los permisos para trabajar con el manantial de la Iglesia y el Río Prieto de Santa Bárbara Almoloya.

2. Selección de los puntos de muestreo.

Se ubicaron y georreferenciaron 5 puntos de muestro, 3 de los cuales se localizan a lo largo del cauce del Río Prieto y dos en el manantial que se encuentra al interior de la Iglesia. Todos los puntos han sido georreferencia con un GPS. La selección de cada uno de los puntos se realizó después de un recorrido de reconocimiento,

con base en las fuentes directas de contaminación, así como a la accesibilidad a la toma de muestra.

Se realizó la descripción de los puntos de muestro registrando la clave que le corresponde, la localidad, coordenadas geográficas, altitud, relieve, profundidad, presencia de erosión, grado de pendiente y uso de suelo.

3. Muestreo.

Se realizaron cuatro muestreos: 2 en época de lluvia y 2 en época de sequía. La toma de muestra de los cuerpos de agua a analizar se realizó por triplicado en cada punto de muestreo con base en los criterios metodológicos especificados en la NMX-AA-003-1980 "Aguas Residuales Muestreo". Las muestras se almacenaron en recipientes previamente etiquetados y se mantuvieron a una temperatura próxima de 4°C hasta que fueron procesadas en el laboratorio del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, para su caracterización fisicoquímica y contenido de metales pesados. Los parámetros de pH (pHmetro electrónico (pHp by HANNA)), Temperatura Ambiente, Temperatura del Agua (termómetro marca LAUKA) y Oxígeno Disuelto (Kit de Campo, marca HACH, modelo OX-2p, #1469-00) se midieron por triplicado *in situ* en todos los puntos de muestreo.

4. Entrevistas y Encuestas Dirigidas.

Se eligió a un grupo de aproximadamente 30 personas mayores de 35 años, que lleven residiendo en la zona un tiempo mínimo de 15 años; con la finalidad de conocer los antecedentes históricos y culturales de ambos cuerpos de agua. Los primeros acercamientos a las personas de la comunidad ya fueron llevados a cabo, se hicieron reuniones con los fiscales de la iglesia de Santa Bárbara Almoloya y con los mandatarios de la Junta Auxiliar con el propósito de generar la conciliación de las solicitudes de permiso para trabajar tanto con el río como con el manantial.

4.1.3. Fase de Laboratorio.

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica y de metales de las muestras colectadas, las muestras se llevaron a temperatura ambiente. Los parámetros que se determinaron son los que se presentan a continuación:

- 2.1. Alcalinidad. Utilizando Kit portátil de alcalinidad de la marca HACH modelo AL- AP.
- 2.2. Conductividad/Temperatura/Salinidad. Utilizando el analizador portátil de conductividad modelo 30/10FT marca Yellow Springs Instrument Co. (YSI 30).
- 2.3. pH. Utilizando tiras reactivas de pH de la marca CIVEQ.
- 2.4. Nitritos y Nitratos. Se utilizó un Kit de prueba modelo NI-12, Cat.No. 14081-00, marca HACH.
- 2.5. Fosfato y Fósforo. Determinación de fosfato y fósforo utilizando el kit fosfato y ortofosfato de modelo PO-14.
- 2.6. Dureza total y Calcio. Este parámetro está regulado bajo la norma oficial NMX-AA-072-SCFI-2001.
- 2.7. Concentración de Metales mediante absorción atómica.
- 2.8. Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Basado en la metodología establecida por la norma oficial mexicana para la determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas NMX-AA-034-SCFI-2001.

Se determinó la concentración de los siguientes metales pesados: Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Cromo (Cr) mediante digestión ácida y un analizador de absorción atómica marca Varian 55B.

Al mismo momento de la toma de muestras para la caracterización del último punto de muestreo se recolectará agua para montar los embalses de fitoextracción debido a que será establecido *ex situ*, con el objetivo de mantener un mayor control, evitar

las pérdidas de las plantas por exceso de contaminantes o robo y controlar la situación del entorno.

4.1.4. Fase de Fitoextracción

4.1.4.1. Selección Vegetal.

Se realizó la obtención de las especies vegetales seleccionadas, Lirio Acuático y Vetiver teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Buena pigmentación.
- Que no presenten ninguna anomalía en cualquiera de sus partes.
- Que sean plantas jóvenes, en el caso del Lirio Acuático se las reconoce por el azulado de sus raíces.

Para el caso del Lirio Acuático, este se obtuvieron San Baltazar Tetela, Puebla. Por otro lado, el Vetiver se obtuvo de un vivero que se encuentra en Santa Clara Ocoyucan.

4.1.4.2. Adaptación.

Una vez adquirido el material vegetal se inició una etapa de adaptación a las condiciones ambientales del área en donde se estableció el ensayo, éste tuvo una duración aproximada de quince días y se inició manteniendo las plantas en condiciones hidropónicas en contenedores de plástico que se distribuyeron al azar (Imagen 1 y 2). En esta etapa se estimuló el crecimiento de la planta con una nutrición adecuada para poder aumentar la biomasa disponible en las tinas y acelerar la absorción de contaminantes. Se monitoreó el crecimiento de las plantas tomando las mediciones pertinentes. Después de este tiempo se trasladaron las que estuvieron en buen estado a las tinas experimentales donde se tomaron muestras iniciales de ambas plantas para comprobar la ausencia de metales pesados.



Imagen 2. Vetiveres recién recolectados en botes en el proceso de adaptación



Imagen 1. Lirios acuáticos recién recolectados en charolas de adaptación (Elaboración propia).

4.1.4.3. Ensayos de fitoextracción.

Las plantas adaptadas y cultivadas de manera hidropónica se colocaron en plataformas flotantes en embalses artificiales con una dimensión de 40x30x20 cm y un volumen aproximado de 20 litros de las aguas contaminadas recolectadas del Río Prieto (Imagen 3). Se estableció un testigo (control) y se realizaron cuatro repeticiones. Dichos embalses se mantuvieron en el fraccionamiento donde radico debido a la situación de la pandemia. El ensayo tuvo una duración total de 8 meses bajo condiciones controladas. Se tomaron muestras de agua y planta de todos los embalses instalados de manera aleatoria cada dos meses hasta el final del ensayo conforme a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-003-1980, con el fin de poder monitorear la dinámica de la fitoextracción.



Imagen 3. Tinas experimentales con las dos especies de plantas, el primer día del ensayo (Elaboración propia).

4.1.4.4. Medición de metales pesados.

El análisis para las muestras de planta se realizó por digestión ácida en raíz, tallo y hoja de la siguiente manera: las plantas se secaron en hornos a 60°C durante 24 horas y pulverizaron (molino eléctrico), se tamizaron (malla 60) y pesaron 0.3 gramos del material, adicionando una mezcla de ácido nítrico y peróxido de hidrógeno en proporción 3:1 y se colocaron en el equipo de digestión MARS 5 XPlus durante el tiempo programado por el equipo para el tipo de muestra (Imagen 4). Posteriormente las muestras fueron aforadas con agua destilada a 50 ml (Imagen 5), envasadas y etiquetadas para ser refrigeradas hasta que se determinó el contenido de cada metal, utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica Varian 55B.



Imagen 5. 4. Molido de las muestras de tejido vegetal de *E. crassipes* y *C. zizanioides* (Elaboración propia).



Imagen 4. Proceso de filtración de las muestras después de salir del digestor ácido y haberse enfriado (Elaboración propia).

Se determinaron el Factor de Bioconcentración (BCF) y Factor de Traslocación (TF), para cada planta y cada metal.

4.1.4.5. Factores de Bioconcentración (FCB) y Traslocación (FT).

Se calculó el factor de bioconcentración (FBC) que es uno de los factores clave para determinar en mejor momento de la fitoextracción. El FBC se refiere a la capacidad de la planta de extraer el metal, movilizarlo en su tejido y almacenarlo en su biomasa (Argota *et al.*, 2014). Se calculó utilizando la siguiente ecuación (Pérez, 2015):

$$FBC = \frac{[MP]_{planta}}{[MP]_{agua}}$$

Dónde: $[MP]_{planta}$ es la concentración total del metal pesado de interés en mg/kg en la biomasa total de planta y $[MP]_{agua}$ es la concentración total del elemento de interés en mg/kg en el agua. Grandes valores de FBC ($\gg 1$) implican una alta capacidad de acumulación.

El factor de translocación (FT) es clave para la fitoextracción, ya que determina en qué parte del vegetal, el contenido del metal pesado es mayor, la ecuación que se utilizó es la siguiente (García-Gallegos *et al.*, 2011):

$$FT = \frac{[MP]_{partes\ aéreas}}{[MP]_{raíz}}$$

Dónde: $[MP]_{partes\ aéreas}$ es la concentración total del elemento de interés en mg/kg en tejido aéreo de la planta y $[MP]_{raíz}$, es la concentración total del metal pesado de interés en mg/kg en la raíz de la planta. Grandes valores de FT ($\gg 1$) implican una alta capacidad de translocación.

4.1.4.6. Tasa de Remediación.

A cada una de las muestras de agua obtenidas durante la experimentación se les determinó la tasa de remediación, es decir, el porcentaje de remoción de metales pesados con respecto al tiempo de tratamiento. Se calculó utilizando la siguiente ecuación (Vidal *et al.*, 2010):

$$Tasa\ de\ remediación\ (\%) = \frac{[MP]_{agua\ inicial} - [MP]_{agua\ final}}{[MP]_{agua\ inicial}} \times 100$$

Dónde: $[MP]_{agua\ inicial}$ se refiere a la concentración total en mg/ kg del elemento de interés en el agua al iniciar la experimentación, $[MP]_{agua\ final}$ es la concentración total en mg/ kg del mismo elemento de interés en el agua después del tratamiento de 60, 120, 180 o 240 días respectivamente.

4.1.5. Fase de Integración.

En esta fase es importante realizar la integración y dimensionar las diferentes fases de la presente investigación como sistema complejo, articular la parte social, el impacto de la industria en la contaminación del río y la propuesta de fitorremediación con las plantas empleadas.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Encuestas y Entrevistas

Como parte del estudio se llevaron a cabo 30 encuestas dirigidas y dos entrevistas a los actores principales que interactúan en el problema que presenta la contaminación del río Prieto en la comunidad de Santa Bárbara Almoloya (**Anexo A**). Estas técnicas cualitativas permitieron determinar el nivel de conocimiento que tienen los habitantes de la comunidad respecto a la situación de los dos cuerpos hídricos y sobre su opinión de cómo el gobierno ha intervenido en cuestiones ambientales en el estado y en el país.

El 80% de los encuestados concordaron que la condición en río hace 50 años era muy buena y que prácticamente uno podía ver especies marinas; además de que más de la mitad (70%) de las personas consideran que no se han tomado las medidas adecuadas para cuidar de los cuerpos de aguas de la comunidad.

Por otro lado, cuando se les pregunto cual creían que era el agente que contaminaba más el río el 60% respondió que se debía a las industrias, el 33.3% que el hombre, % el desinterés del gobierno y el % que los animales. Hasta el momento ninguno de los encuestados mencionó estar presentando afectaciones directas por tener el río contaminado.

Un dato curioso es que a pesar de que la mayoría (93.3%) sabe acerca de la problemática que se vive en el estado de Puebla y en el país con respecto a la crisis del agua, solo el 31% conoce iniciativas para proteger y conservar los ríos limpios.

Cuando se les hizo la pregunta de cuál pensaban que era la postura del gobierno en temas de cuidado del medio ambiente el 56.7% considera que es muy mala, el 33.3% que es indiferente y el 10% restante que es mala.

5.2. Parámetros fisicoquímicos preliminares del río Prieto

Debido al tiempo y a la situación de la pandemia no fue posible medir los parámetros fisicoquímicos que toma en cuenta CONAGUA para la determinación de la calidad del agua, por ende, se recurrió a la base de datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Agua para determinar el promedio de los 8 parámetros durante un período de 4 años (2016 – 2020) y tomar como referencia dichos valores para identificar la situación en la que se encuentra el río. En la tabla 3 se muestran los valores promediados para cada parámetro.

Tabla 3. Resultados del análisis preliminar de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua del río Prieto.

Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Coliformes Totales (NMP/100ml)	E_COLI (NMP/100ml)	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	Sólidos Totales Suspendidos (SST) mg/L	Toxicidad (UT)	% de Saturación de Oxígeno	Turbiedad (UNT)
13807.5	14155	12704.45	93.48	311.85	59.40	7.14	19.89	72.39

Fuente: Red de Monitoreo de CONAGUA 2016-2020.

El informe de Monitoreo de Calidad del Agua de CONAGUA muestra las escalas de clasificación del agua de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos obtenidos anteriormente. En la figura 17 se puede apreciar la escala dispuesta para coliformes fecales con su clasificación y color respectivo.

Criterio (NMP/100 ml)	Clasificación	Color
CF ≤ 100	EXCELENTE No CONTAMINADA	AZUL
100 < CF ≤ 200	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON CALIDAD SATISFACTORIA PARA LA VIDA ACUÁTICA Y PARA USO RECREATIVO CON CONTACTO PRIMARIO	VERDE
200 < CF ≤ 1,000	ACEPTABLE AGUAS SUPERFICIALES CON CALIDAD SATISFACTORIA COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y PARA RIEGO AGRÍCOLA	AMARILLO
1,000 < CF ≤ 10,000	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA	NARANJA
CF > 10,000	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA	ROJO

Figura 17. Escala de clasificación de calidad de agua con base en coliformes fecales.

C.F. (NMP/100 ml)	Clasificación	Color
13,807.5	Fuertemente Contaminada	

El valor que se tiene de coliformes fecales es de 13807.5 NMP/100 ml aproximadamente, verificando en que criterio se ubica se puede observar que estaría clasificándose como fuertemente contaminada, es decir, contiene una fuerte contaminación bacteriológica.

La figura 18 muestra la escala de clasificación de la calidad del agua con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅).

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
DBO ₅ ≤ 3	EXCELENTE No CONTAMINADA	AZUL
3 < DBO ₅ ≤ 6	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE	VERDE
6 < DBO ₅ ≤ 30	ACEPTABLE CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. AGUAS SUPERFICIALES CON CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN O CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE	AMARILLO
30 < DBO ₅ ≤ 120	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN MUNICIPAL	NARANJA
DBO ₅ > 120	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES	ROJO

Figura 18. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅).

Si se compara esta escala con el valor que está presente en el río se puede identificar que, con respecto a este parámetro, el agua está contaminada (naranja) con descargas de aguas residuales crudas, principalmente municipales.

DBO ₅ (mg/L)	Clasificación	Color
93.48	Contaminada	

La escala de clasificación con base en la demanda química de oxígeno se muestra en la figura 19.

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
DQO ≤ 10	EXCELENTE NO CONTAMINADA	AZUL
10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE Y NO BIODEGRADABLE	VERDE
20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. AGUAS SUPERFICIALES CON CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN O CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE	AMARILLO
40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS, PRINCIPALMENTE DE ORIGEN MUNICIPAL	NARANJA
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES	ROJO

DQO (mg/L)	Clasificación	Color
311.85	Fuertemente contaminada	

Comparando esta escala con el resultado de la tabla 3, la calidad del agua del río con base en la DQO se considera **Fuertemente Contaminada**.

Figura 19. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la demanda química de oxígeno (DQO).

Ahora bien, en cuanto a los sólidos totales suspendidos, CONAGUA establece la escala de clasificación que se muestra en la figura 20.

Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
SST ≤ 25	EXCELENTE CLASE DE EXCEPCIÓN, MUY BUENA CALIDAD	AZUL
25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD AGUAS SUPERFICIALES CON BAJO CONTENIDO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS, GENERALMENTE CONDICIONES NATURALES. FAVORECE LA CONSERVACIÓN DE COMUNIDADES ACUÁTICAS Y EL RIEGO AGRÍCOLA IRRESTRICTO	VERDE
75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE AGUAS SUPERFICIALES CON INDICIO DE CONTAMINACIÓN. CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS BIOLÓGICAMENTE. CONDICIÓN REGULAR PARA PECES. RIEGO AGRÍCOLA RESTRINGIDO	AMARILLO
150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES DE MALA CALIDAD CON DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS. AGUAS CON ALTO CONTENIDO DE MATERIAL SUSPENDIDO	NARANJA
SST > 400	FUERTEMENTE CONTAMINADA AGUAS SUPERFICIALES CON FUERTE IMPACTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CRUDAS MUNICIPALES Y NO MUNICIPALES CON ALTA CARGA CONTAMINANTE. MALA CONDICIÓN PARA PECES	ROJO

Los sólidos totales suspendidos catalogan las aguas del río prieto como “Buena Calidad”, es decir, que no tienen una carga muy contaminante y el contenido presente favorece la vida acuática en la zona, algo claramente contrastante si se considera los anteriores parámetros.

SST (mg/L)	Clasificación	Color
59.40	Buena Calidad	

Figura 20. Escala de clasificación de calidad del agua con base en los sólidos totales suspendidos (SST).

El siguiente parámetro es importante, muestra en qué nivel se encuentra la toxicidad y que tanto podría afectar la vida acuática y las zonas aledañas al río, la figura 21 desglosa los valores de la escala de clasificación de la calidad del agua para la toxicidad.

Criterio (UT)	Clasificación	Color
TA < 1	TOXICIDAD NO DETECTABLE	AZUL
1 ≤ TA ≤ 1.33	TOXICIDAD BAJA	VERDE
1.33 < TA < 5	TOXICIDAD MODERADA	AMARILLO
TA ≥ 5	TOXICIDAD ALTA	ROJO

UT	Unidades de toxicidad
TNC	Toxicidad no cuantificable (interpretar como toxicidad alta TA ≥ 5)
TND	Toxicidad no detectable (TA < 1)

Figura 21. Escala de clasificación de calidad del agua con base en la Toxicidad.

Toxicidad (UT)	Clasificación	Color
7.14	Toxicidad Alta	

La tabla 3 muestra que el valor encontrado en el río Prieto para la toxicidad es de 7.14 UT, el cual encaja con la escala de clasificación se puede observar que tiene una toxicidad alta.

Para conocer el estado del río en estos primeros meses del año, se tomó una muestra aleatoria del punto 2 del río para analizar 3 parámetros: Coliformes totales, Coliformes fecales y *E. coli*. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos del punto #2 del río Prieto en 2022.

Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)
46 x 10 ⁶	75 x 10 ⁶	Presencia

Fuente: Laboratorio de Análisis Clínicos Futura Lab (2022)

Comparando estos resultados con los que la Red de Monitoreo de la CONAGUA obtuvo durante 4 años, se puede observar que desde su última actualización hasta 2022 el nivel de coliformes totales y fecales tuvo un incremento considerable que sigue manteniendo la calidad del agua en una situación de alta contaminación, en cuanto a la *Escherichia coli* (*E. coli*) sigue existiendo presencia de dicha bacteria.

5.3. Parámetros químicos del agua de manantial y pozo

Se llevó a cabo un análisis preliminar de los parámetros químicos en el manantial de la iglesia para evaluar y conocer de primera instancia las condiciones en las que se encontraba (Imagen 6 y 7). A diferencia del río, la Red de Monitoreo de CONAGUA no tiene incluida en su base de datos respecto a este cuerpo de agua, por lo que se decidió analizar los parámetros que se encuentran en la tabla 5.

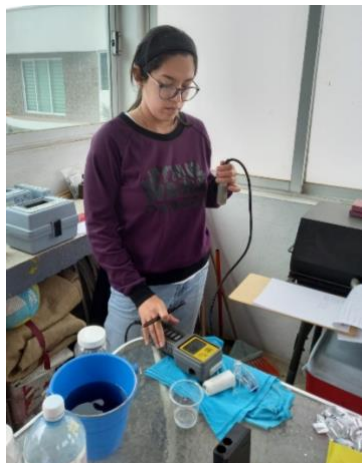


Imagen 7. Análisis de conductividad eléctrica y salinidad (Elaboración propia).



Imagen 6. Análisis de Alcalinidad de las muestras de agua (Elaboración propia).

Tabla 5. Parámetros químicos del manantial y pozo de la Iglesia de Santa Bárbara Almoloya.

Punto de Muestreo	pH	Conductividad (mS)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	Nitritos (mg/L NO ₂ ⁻)	Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	Fosfatos (mg/L PO ₄)	Fósforo (mg/L P)
M.M. I	5	0.513	23.3	3	0.0267	986.6	4.33	1.44
	± 0	± 0.0038	± 0.611	± 0	± 0.0115	± 46.18	± 1.53	± 0.509
M.P. I	5	0.416	17.87	4.3	0.0967	813.3	6.33	2.11
	± 0	± 0.00833	± 1.154	± 1.53	± 0.0907	± 23.094	± 1.154	± 0.385

5.4. Modelo de Integración de la Situación del Río Prieto.

Se utilizó un marco conceptual que engloba los indicadores ambientales necesarios para la determinación de la situación de una problemática medioambiental, este es el conocido Modelo de DPSIR (Fuerza motriz – Presión – Estado – Impacto – Respuesta) que proviene del marco de referencia PER (Presión – Estado – Respuesta). Básicamente el modelo o esquema DPSIR muestra la relación causal existente entre los diversos componentes que conforman los sistemas sociales, económicos y ambientales para poder determinar la situación que desencadena las actividades humanas dentro de un hábitat y los posibles cambios que éstas pudieran introducir al estado del sistema (Dávila, 2007; Duque *et al.*, 2012).

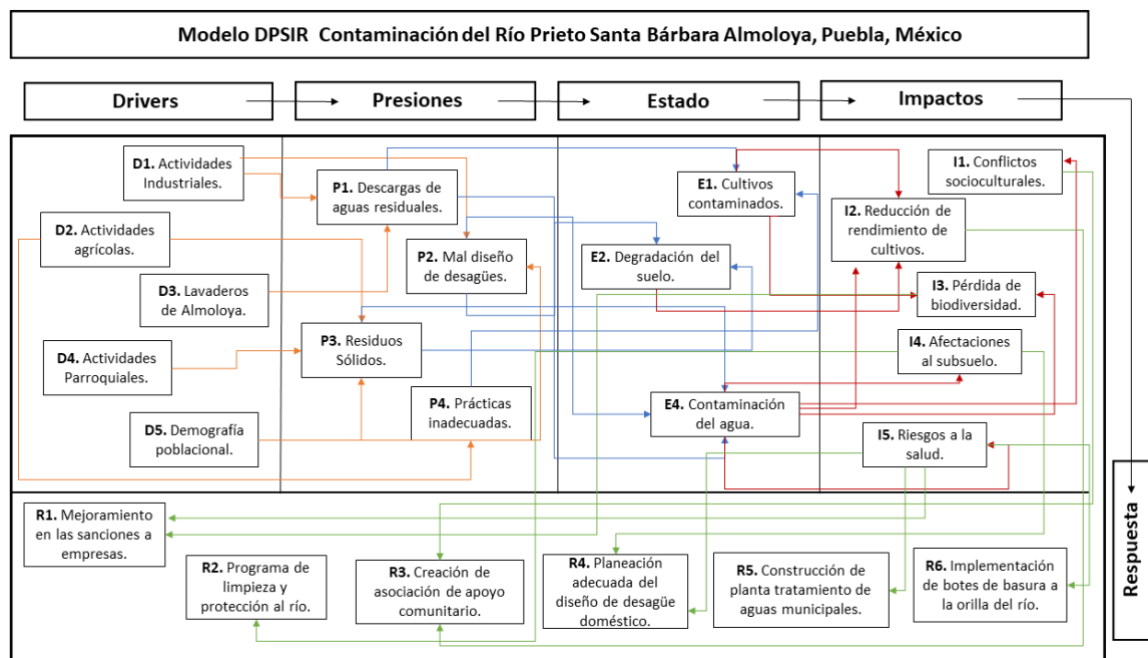


Figura 22. Esquema DPSIR de la situación de contaminación del Río Prieto en la comunidad de Santa Bárbara Almoloya, Puebla, México (Elaboración propia).

Como se aprecia en la Figura 22 el primer componente de este esquema son las **Fuerzas Motrices** que representan a las actividades antropogénicas que van a ser las causantes de las presiones en el sistema, para este caso se cuentan con 5 fuerzas motrices que son las principales causas de la contaminación en este río que se analizó.

De esas fuerzas se despliegan los **Indicadores de Presión** que, en ciertos modelos, pueden clasificarse como presiones directas o indirectas y que son producto de las actividades humanas. Para este modelo se detectaron 4 indicadores de presión provenientes de los drivers que son: **P1. Descargas de aguas residuales, P2. Mal diseño de desagüe, P3. Residuos sólidos y P4. Prácticas inadecuadas.** Algo importante de mencionar es que una fuerza motriz puede ser la causante de más de una presión y que un mismo indicador de presión puede provenir de diferentes fuerzas motrices.

La influencia que ejercen las presiones termina estableciendo las medidas de calidad ambiental y la cantidad de recursos naturales que estarán comprometidos, esto se conoce como **Estado**. Por ejemplo, en la figura 22 la P1 (Descargas de aguas residuales) produce 3 estados: **E.1. Contaminación de cultivos, E.2. Degradación de suelos y E.3. Contaminación de agua;** asimismo la presión 2 (P2) conduce a un estado de contaminación de cultivos y agua. La presión 3 (P3) conlleva a degradar los suelos y contaminar el agua, y finalmente la presión 4 (P4) genera cultivos contaminados.

Toda esta secuencia de interrelaciones recae en los de **Impactos** que son producto de los cambios originados en el sistema, aquí en este modelo son cinco los impactos más considerables que son: **I1. Conflictos socioculturales, I2. Reducción del rendimiento de los cultivos, I3. Pérdida de biodiversidad, I4. Afectaciones al subsuelo e I5. Riesgos a la salud.**

Finalmente, todo lo anterior determina **Respuestas** que dan solución a las afectaciones del sistema analizado tomando en cuenta a los sectores involucrados de manera directa o indirectamente. Para el caso del Río de Sta. Bárbara Almoloya se da como resultado 6 respuestas inmediatas: **Mejoramiento a las sanciones de las empresas, Programa de limpieza y protección del río, Creación de una asociación de apoyo comunitario, Planeación adecuada del diseño de**

desagüe, Construcción de planta de tratamiento de aguas municipales e Implementación de botes de basura a la orilla del río.

5.5. Análisis preliminar de metales pesados

Las muestras de agua que se obtuvieron de los tres puntos del río como del manantial y el pozo de la iglesia de Sta. Bárbara Almoloya se sometieron al proceso de digestión ácida (Imagen 8 y 9) y al espectrofotómetro de absorción atómica para determinar las concentraciones de Cadmio, Cromo, Plomo y Cobre tal como se muestra en la imagen 10, dicho proceso dio como resultado los datos que se muestran en la tabla 6 que se presenta a continuación.



Imagen 8. Muestras de agua dentro del digestor ácido. (Elaboración propia).



Imagen 9. Ingreso de parámetros en el equipo de digestión ácida para procesar las muestras de agua (Elaboración propia).



Imagen 10. Análisis de metales pesados en el equipo de espectrofotometría de absorción atómica (Elaboración propia).

Tabla 6. Concentraciones de metales pesados en mg/L de las muestras de ambos cuerpos de agua que se utilizaron para llenar las tinas experimentales.

Punto de Muestreo	Cromo (Cr mg/L)	Cadmio (Cd mg/L)	Plomo (Pb mg/L)	Cobre (Cu mg/L)	Zinc (Zn mg/L)	Níquel (Ni mg/L)
MR1	0.9	0	0	0.6	7.61	17.2
MR2	0.3	0	0	0.3	6.44	16.3
MR3	0.2	0	0	176.7	6.84	18.3
Pozo	0	0	0	0	7.13	21.1
Manantial	0	0	0	0	7.35	21.3

Nota: MR1 = Muestra de río #1, MR2 = Muestra de río #2, MR3 = Muestra de río #3.

Así mismo, se evaluó que las plantas que iban a usarse en las tinas experimentales no contarán con ninguna concentración de metales pesados, tal como lo muestra la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de previo de metales pesados en Lirio acuático (*E. crassipes*) y Vetiver (*C. zizanioides*).

Especie	Cromo (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Zinc (mg/L)	Níquel (mg/L)
<i>E. crassipes</i>	0	0	0	0	0	0
<i>C. zizanioides</i>	0	0	0	0	0	0

Se utilizaron 3 soluciones patrones de cromo, cadmio, cobre, zinc y níquel; y 2 soluciones patrón para plomo como se muestra en la tabla 8, esto con la finalidad de crear una curva de calibración que permitiera determinar la cantidad de cada metal que pudiera existir en el agua tanto del río como del manantial y el pozo.

Tabla 8. Soluciones patrón de los cuatro metales a analizar que sirven de valores de referencia en la medición de las concentraciones de las muestras de agua.

Metal Pesado	Solución patrón en ppm		
Cromo (Cr)	5	10	20
Cadmio (Cd)	1	2	3
Plomo (Pb)	10	20	
Cobre (Cu)	2	4	8
Zinc (Zn)	0.5	1	1.5
Níquel (Ni)	5	10	15

De acuerdo con los datos encontrados se puede observar que los 3 puntos del río Prieto (*Tabla 6*) tuvieron únicamente concentraciones de cromo, cobre, zinc y níquel, en el punto de muestreo #3 la solución patrón rebasó la más alta (8ppm) por lo que se tuvo que realizar una disolución en proporción 1:2 (5 ml de muestra y 10 ml de agua destilada) para poder llevar a cabo la lectura. Por otro lado, en el manantial y el pozo se observaron vestigios de zinc y níquel.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles, pero actualmente se actualizó al año 2021 (*PROY – NOM – 001 - SEMARNAT – 2021*)

y algunos valores de metales pesados fueron incrementados y otros disminuyeron, en la *Tabla 9* se pueden ver desglosados los valores de los metales de interés.

Tabla 9. Límites máximos permisibles de concentraciones en mg/L de metales pesados en Ríos, Arroyos, Canales y Drenes. PROY-NOM-001 – SEMARNAT – 2021.

Metal de Interés	Concentraciones promedio diarias (mg/L)	Concentraciones promedio mensuales (mg/L)
Cromo	1.25	1.0
Cadmio	0.3	0.2
Plomo	0.3	0.2
Cobre	5	4
Zinc	15	10
Níquel	3	2

De acuerdo con la información anterior, el punto número 3 del río (*Tabla 6*) rebasó los límites de cobre para las concentraciones promedio diarias y mensuales. Por otro lado, el manantial y el pozo de la iglesia también estuvieron por encima de lo permitido a nivel mensual en las concentraciones de níquel.

5.6. Análisis del contenido de metales pesados (mg/L) en los puntos del río y manantial.

Ir a **Anexo B** para ver resultados obtenidos por cada período de tratamiento.

5.6.1. Punto de Muestreo de Río #1 (MR1)

Tabla 10. Concentración de metales pesados (mg/L) en aguas del punto #1 del Río Prieto – Tratamiento Lirio acuático.

Punto Muestreo 1						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.9	0	0	0.6	7.61	17.2
60	0	0	0	0	7.18	17.5
120	0	0	0	0	4.76	11.1
180	0	0.8	4.1	0.1	0.42	1.9
240	0	0	1.6	0.08	0.12	0.14

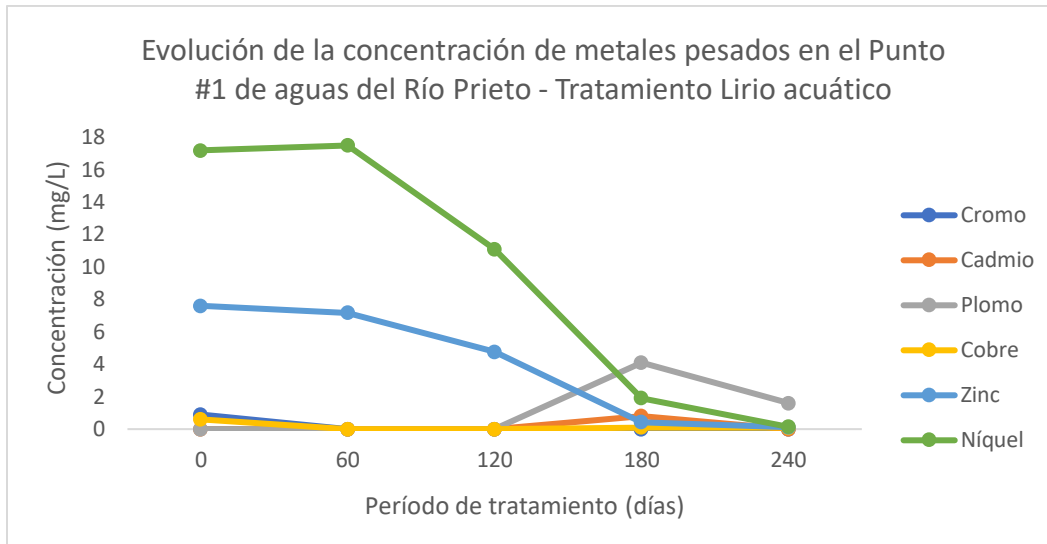


Figura 23. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #1 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 11. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en el punto #1 del río Prieto – Tratamiento con Vetiver.

Punto Muestreo 1						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.9	0	0	0.6	7.61	17.2
60	0	0	0	0	7.37	20.1
120	0	0	0	0	5.06	11.1
180	0.1	0.8	4.1	0.2	0.53	1.1
240	0	0	1.03	0.05	0.22	0.15

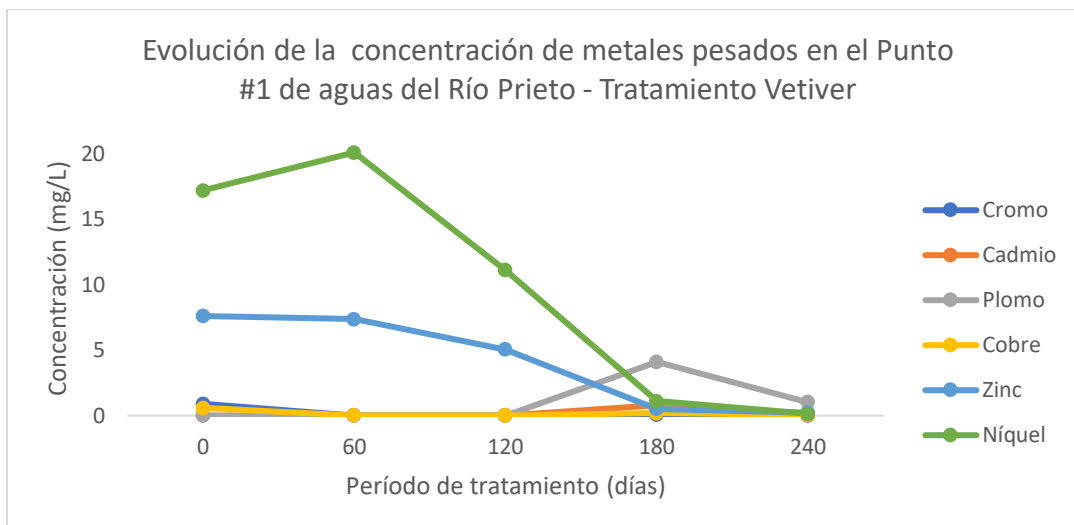


Figura 24. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #1 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).

5.6.2. Punto de Muestreo de Río #2 (MR2)

Tabla 12. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en el punto #2 del río Prieto – Tratamiento con Lirio acuático.

Punto Muestreo 2						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.3	0	0	0.3	6.44	16.3
60	0	0	0	0	7.83	17.4
120	0	0	0	0	5.27	8.2
180	0	0.8	3.8	0.3	0.53	1.1
240	0	0	2.02	0.24	0.05	0.17

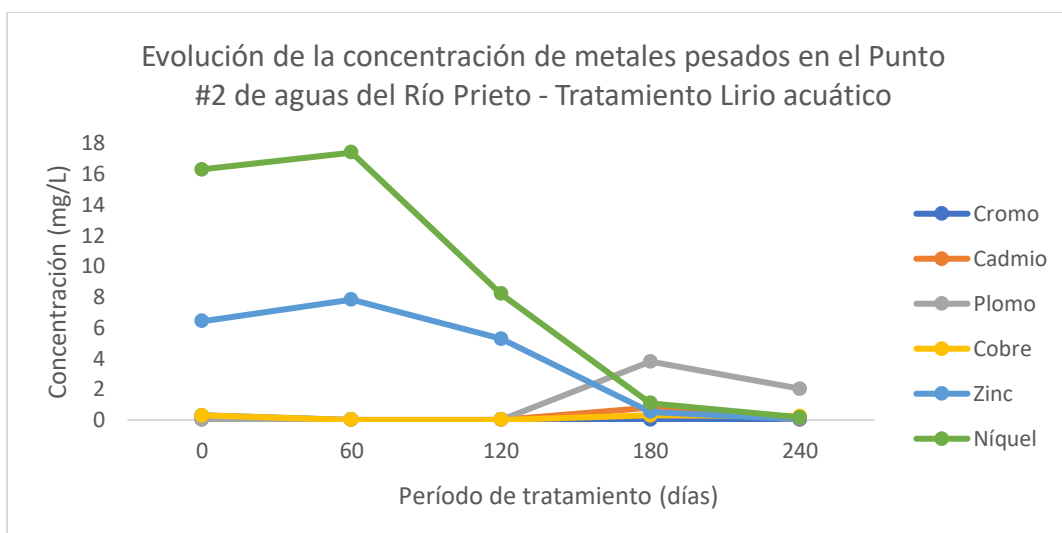


Figura 25. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #2 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 13. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #2 del río Prieto – Tratamiento con Vetiver.

Punto Muestreo 2						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.3	0	0	0.3	6.44	16.3
60	0	0	0	0	7.83	22.2
120	0	0	0	0	6.35	12.3
180	0.1	0.9	3.9	0.3	0.45	1
240	0	0	1.33	0.12	0.08	0

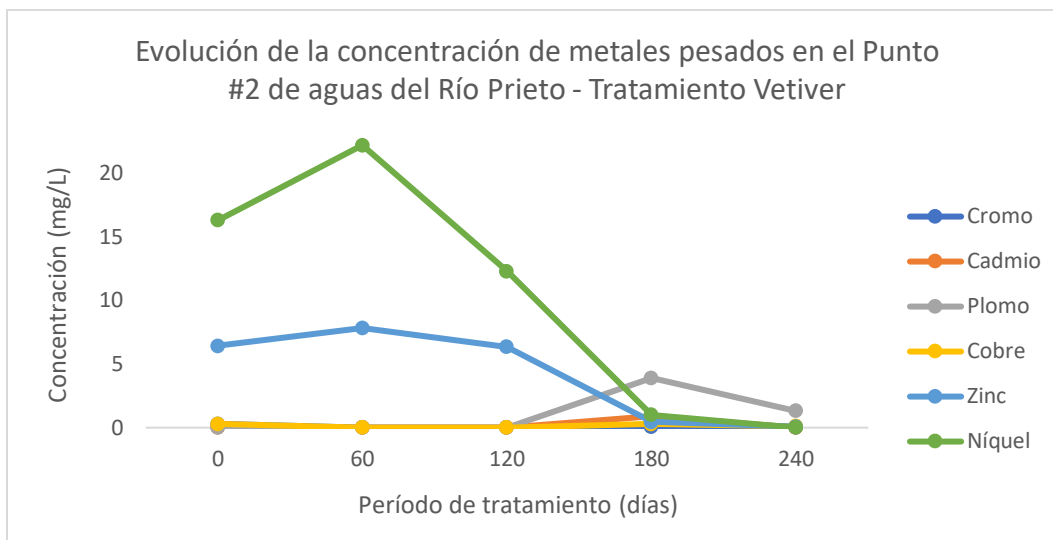


Figura 26. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #2 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).

5.6.3. Punto de Muestreo de Río #3 (MR3)

Tabla 14. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #3 del río Prieto – Tratamiento con Lirio acuático.

Punto Muestreo 3						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.2	0	0	176.7	6.84	18.3
60	0	0	0	0	6.69	20
120	0	0	0	0	5.82	5.6
180	0	0.9	3.7	0.2	0.91	1.1
240	0	0	1.51	0.14	0.25	0

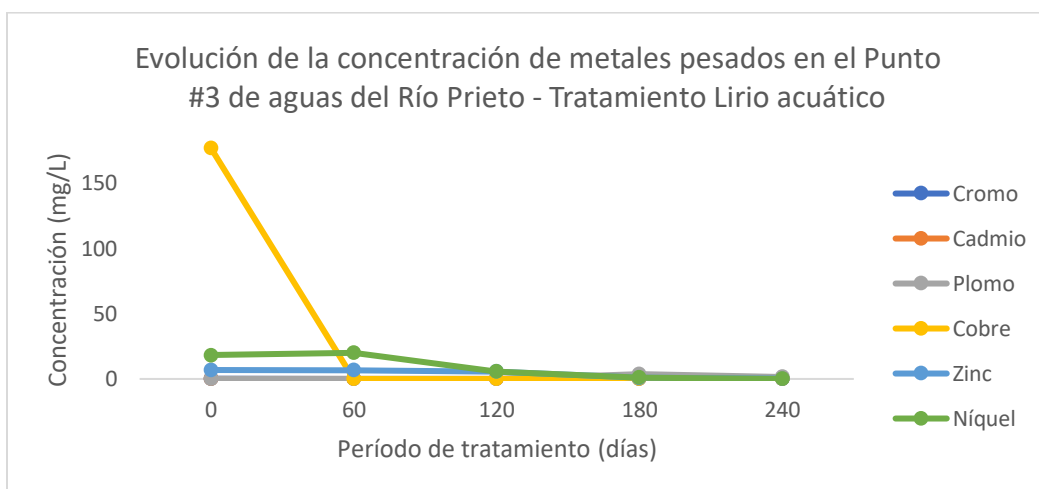


Figura 27. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #3 del río con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 15. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en punto #3 del río Prieto - Tratamiento Vetiver.

Punto Muestreo 3						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0.2	0	0	176.7	6.84	18.3
60	0	0	0	0	7.73	17.7
120	0	0	0	0	6.19	5.5
180	0.1	0.9	3.7	0.2	0.82	1
240	0	0	1.98	0.2	0.1	0.03

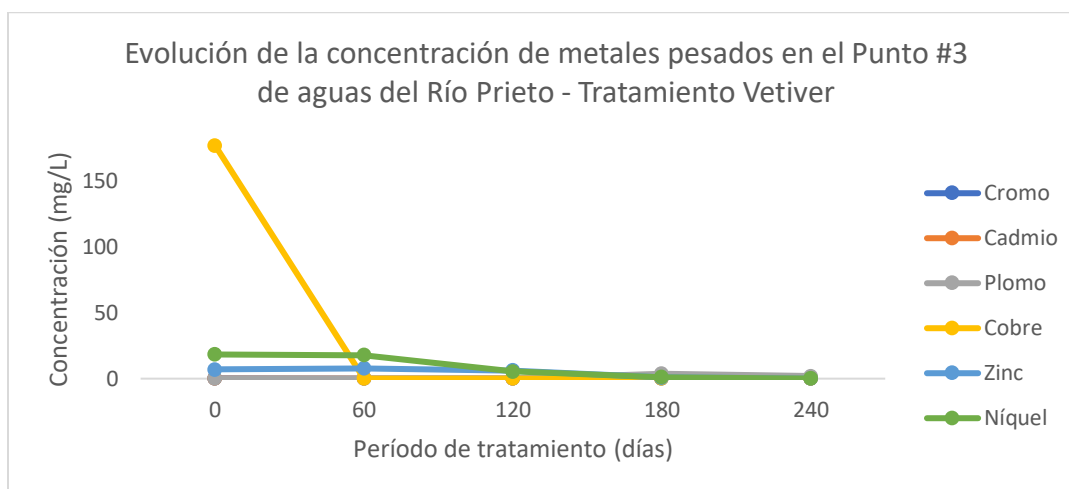


Figura 28. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el punto #3 del río con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).

5.6.4. Punto de Muestreo Manantial Iglesia

Tabla 16. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en manantial de la iglesia – Tratamiento con Lirio acuático.

Manantial						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0	0	0	0	7.13	21.1
60	0	0	0	0	8.01	21
120	0	0	9.8	0	6.24	7.1
180	0	0.9	3.8	0.1	0.73	1
240	0	0	0	0	0	0

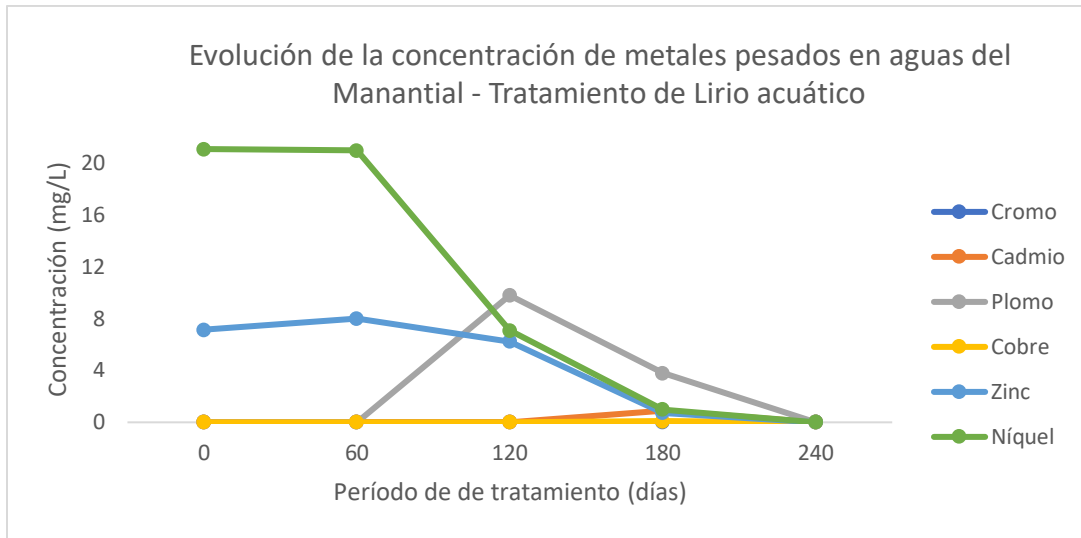


Figura 29. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el manantial de la iglesia con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 17. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en manantial de la iglesia – Tratamiento con Vetiver.

Manantial						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0	0	0	0	7.13	21.1
60	0	0	0	0	7.95	17.8
120	0	0	9.7	0	7.44	4.2
180	0	0.8	4	4	0.74	1.1
240	0	0	0	0	0.23	0.09

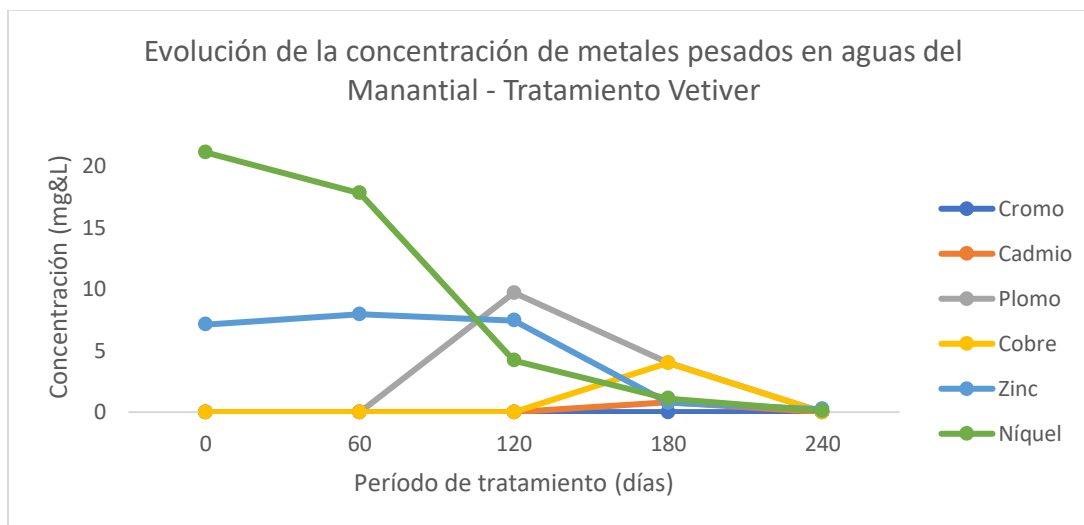


Figura 30. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el manantial de la iglesia con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).

5.6.5. Punto de Muestreo Pozo

Tabla 18. Concentraciones de metales pesados (mg/L) en pozo de la iglesia – Tratamiento con Lirio acuático.

Pozo						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0	0	0	0	7.35	21.3
60	0	0	0	0	6.92	18.6
120	0	0	9.7	0	6.42	7.6
180	0.1	0.8	3.9	0.2	0.6	1.2
240	0	0	0	0.15	0.07	0

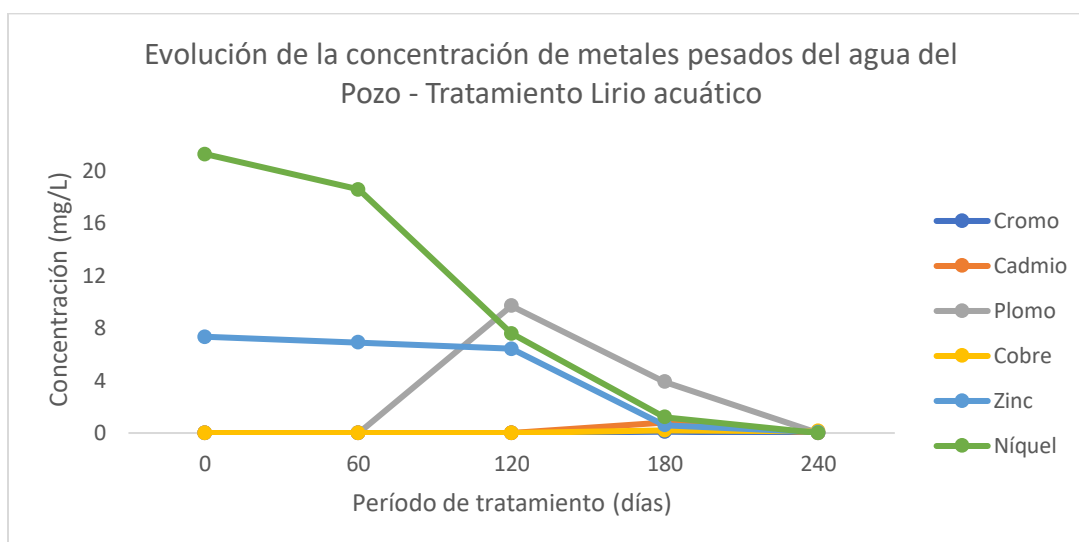


Figura 31. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el pozo de la iglesia con tratamiento de lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 19. Concentración de metales pesados (mg/L) en el pozo de la iglesia – Tratamiento con Vetiver.

Pozo						
Tiempo (días)	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
0	0	0	0	0	7.35	21.3
60	0	0	0	0	6.79	20.4
120	0	0	9.4	0.5	6.85	2.9
180	0.1	0.7	3.9	0.2	0.52	1
240	0	0	0	0.14	0	0.08

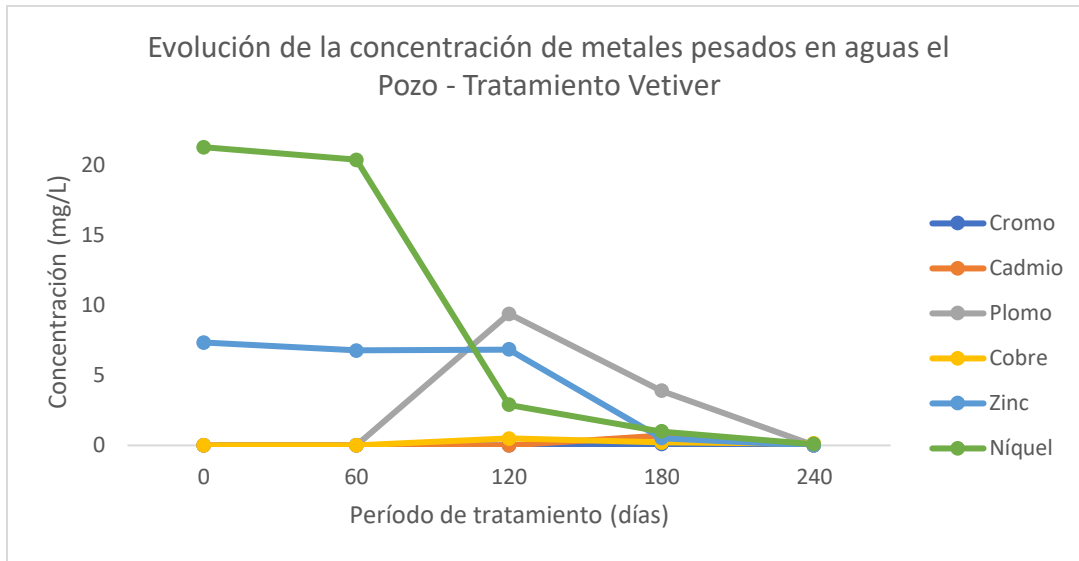


Figura 32. Gráfico evolución de la concentración de metales pesados en el pozo de la iglesia con tratamiento de vetiver (Elaboración propia).

Analizando las gráficas presentadas con anterioridad se observa una mejoría muy buena en la calidad del agua de las tinas experimentales con los tratamientos aplicados. Tanto para el lirio acuático como el vetiver se puede ver que se presentaron algunas alteraciones en las concentraciones de zinc, níquel y plomo a lo largo de todo el período de tratamiento, esto debido a que pudieron haber intervenido varios factores externos no controlables como: 1) las descargas de aguas residuales que llegaban al río contenían un mayor contenido de estos metales en algunos meses y 2) la zona donde se encontraba el experimento estaba expuesta al contacto del paso de trenes, fábrica de ladrillos, paso constante de autos, entre otros.

5.7. Análisis de fitoextracción en los puntos del Río y Manantial

5.7.1. Comportamiento Lirio acuático

Tabla 20. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #1 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #1 Río - Lirio acuático		
Metal Interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	119.00	16.67
Cadmio	10.17	8.50
Plomo	190.50	157.67
Cobre	81.50	53.33
Zinc	272.50	398.67
Níquel	446.33	441.33

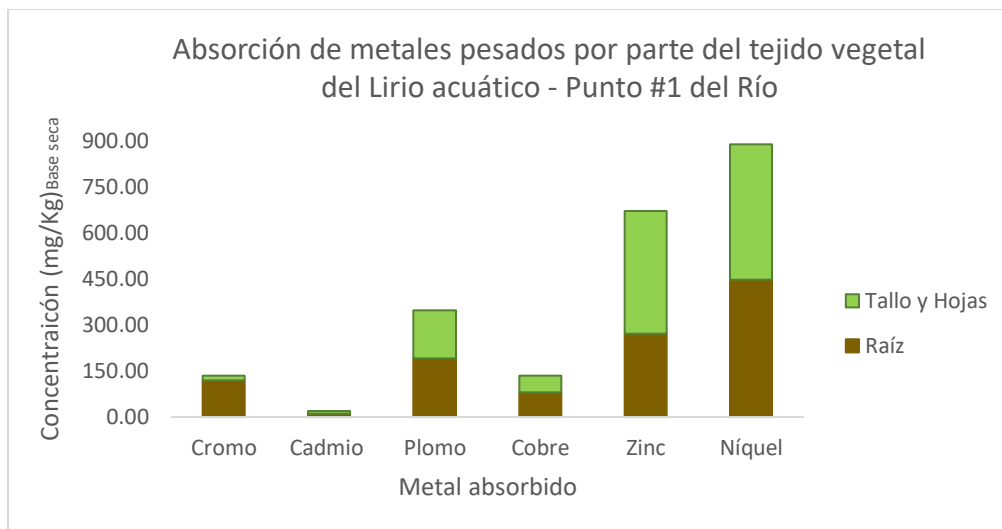


Figura 33. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #1 del río (Elaboración propia).

Tabla 21. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #2 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #2 Río - Lirio acuático		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	236.33	5
Cadmio	11.5	8.83
Plomo	145.83	136.33
Cobre	101	38.17
Zinc	357.33	228.5
Níquel	567.83	417.17

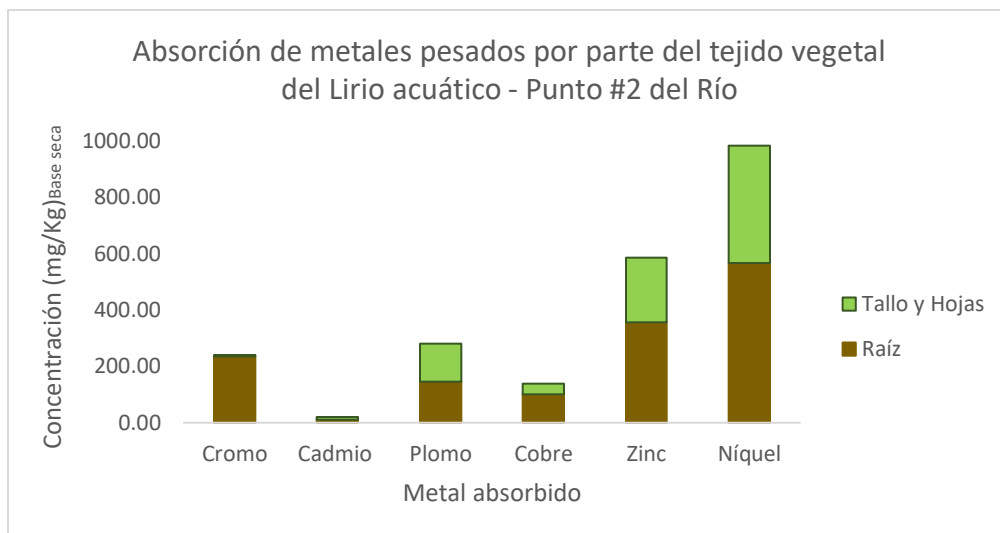


Figura 34. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #2 del río (Elaboración propia).

Tabla 22. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #3 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #3 Río - Lirio acuático		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	109.84	1.67
Cadmio	11.67	10.83
Plomo	181.50	131.8
Cobre	104.00	38.17
Zinc	357.67	254.51
Níquel	493.68	484.68

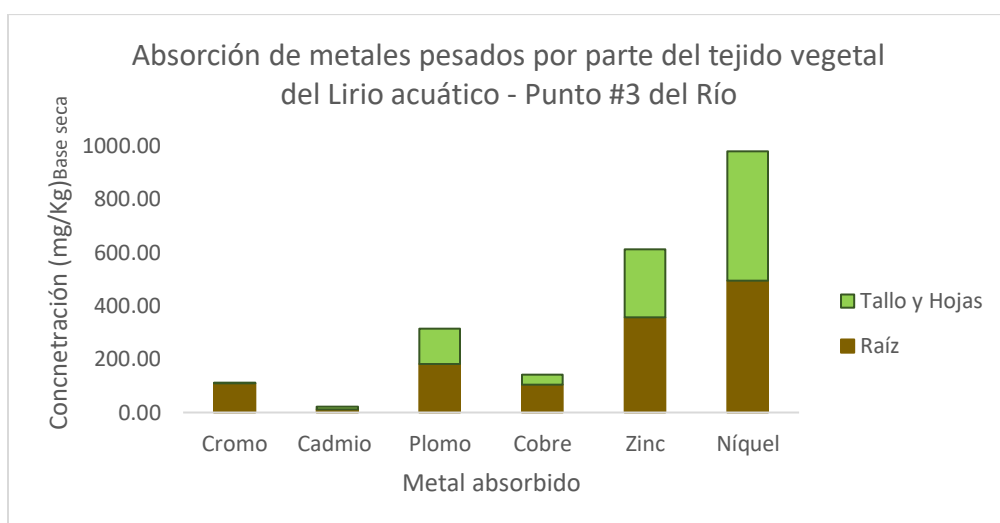


Figura 35. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el punto #3 del río (Elaboración propia).

Tabla 23. Concentración de metales pesados (mg/L) de la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el manantial de la iglesia al final del período de exposición.

Punto Manantial - Lirio acuático		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	16.67	0
Cadmio	15.00	14.17
Plomo	159.34	159.50
Cobre	29.00	5
Zinc	189.00	324.51
Níquel	404.51	531.68

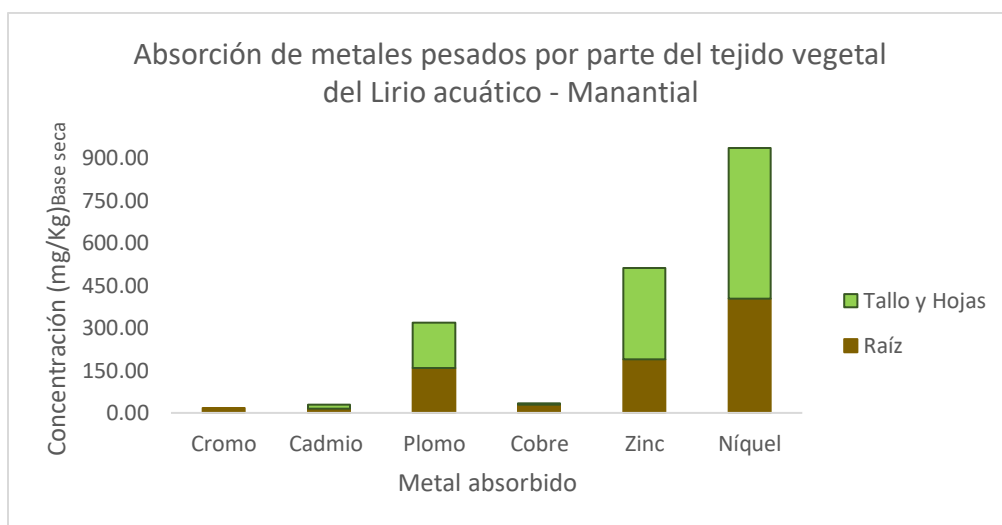


Figura 36. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de los metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el manantial de la iglesia (Elaboración propia).

Tabla 24. Concentración de metales pesados (mg/L) de la raíz y tallo y hojas del Lirio acuático en el pozo de la iglesia al final del período de exposición.

Punto Pozo - Lirio acuático		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	38.33	0
Cadmio	16.67	15.67
Plomo	206.67	181.50
Cobre	54.00	16.83
Zinc	272.34	220.17
Níquel	505.01	466.84

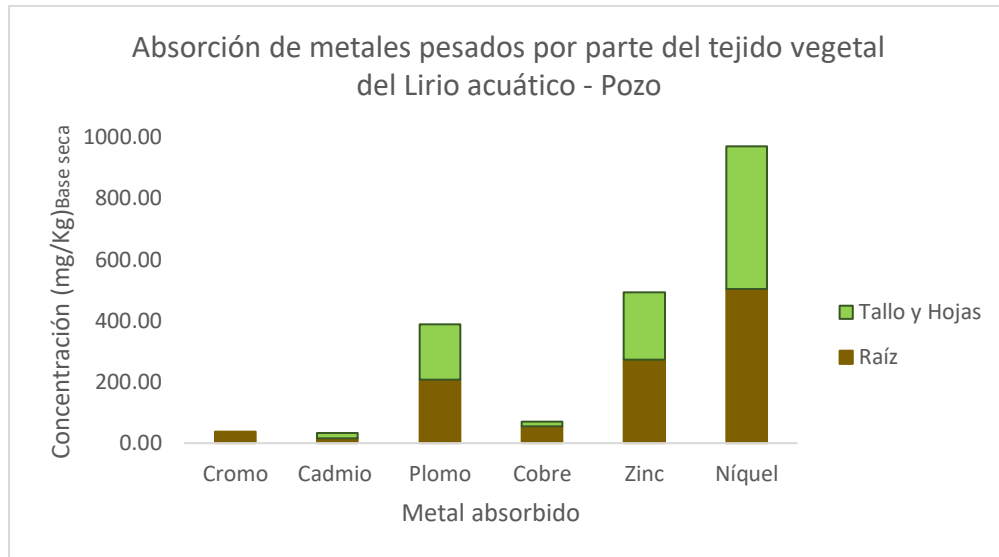


Figura 37. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Lirio acuático en el pozo de la iglesia (Elaboración propia).

Para evaluar que órgano vegetativo fue el que tuvo un desempeño más favorable en la absorción de los metales pesados presentes en las tinas experimentales de los 5 puntos analizados se realizó una prueba T para muestras independientes con la finalidad de obtener la comparativa entre la raíz y el pecíolo y láminas del lirio acuático. Este estadístico requiere de los siguientes criterios para poder evaluar y determinar que parte es la que retiene más contaminante:

- Se establece un intervalo de confianza del 95%.
- Un nivel de significancia α de 0.5 o 5%.
- Una hipótesis nula H_0 : ambos órganos vegetativos acumulan la misma cantidad de metales pesados.
- Una hipótesis alternativa H_1 : la raíz acumula más metales pesados que los demás órganos vegetativos.
- Para aceptar H_0 $p\text{-value} > 0.5$ de lo contrario se acepta H_1 .

```
Welch Two Sample t-test

data: Concentración by Parte.V
t = 1.7064, df = 5.5176, p-value = 0.1431
alternative hypothesis: true difference in means between group R and group T&H is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.5227817  2.7715817
sample estimates:
mean in group R mean in group T&H
    6.8456         5.7212
```

Figura 38. Estadístico de Welch para una prueba T de dos muestras independientes donde se aprecian los valores de t, grados de libertad y valor de p.

La figura 38 muestra los valores obtenidos por el estadístico de Welch, el cual establece que para la base de datos proporcionada el **valor p es de 0.1431**. Utilizando los criterios antes mencionados se *concluye que el valor de p no es mayor al valor del nivel de significancia α y por tanto se rechaza la hipótesis nula* determinando así que la raíz es el órgano vegetativo que más metales pesados acumula.

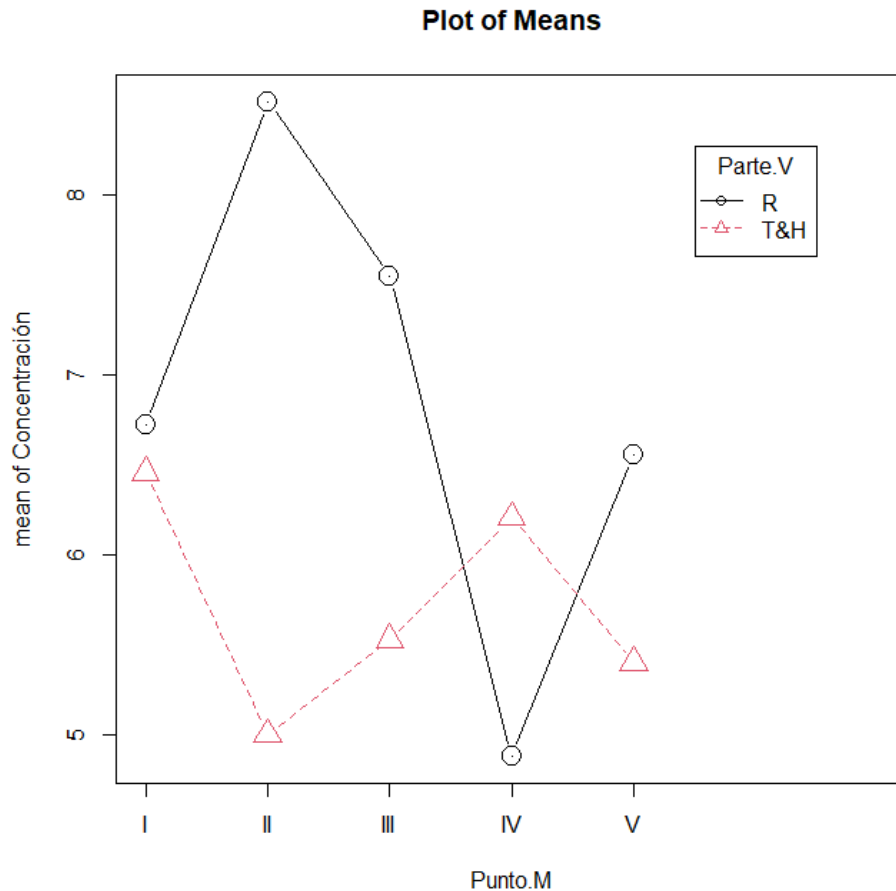


Figura 39. Gráfico de medias de la concentración de las partes vegetativas en los 5 puntos de muestreo analizados.

Para corroborar el resultado proporcionado por el estadístico de Welch la figura 39 muestra cual es el comportamiento de las medias de concentración para cada parte vegetativa de las cinco tinas experimentales con el agua de los puntos de muestreo analizados. Se observa que efectivamente la raíz absorbe una mayor concentración de metales pesados en casi todas las tinas experimentales en contraste con el pecíolo y las láminas, solamente se identifica que en la tina IV correspondiente a aguas del manantial es el caso contrario.

5.7.2. Comportamiento Vetiver

Tabla 25. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y tallo y hojas del Vetiver en el punto #1 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #1 del Río - Vetiver		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	106.84	21.50
Cadmio	17.33	15.83
Plomo	171.67	152.00
Cobre	113.17	30.17
Zinc	259.17	189.67
Níquel	457.84	526.68

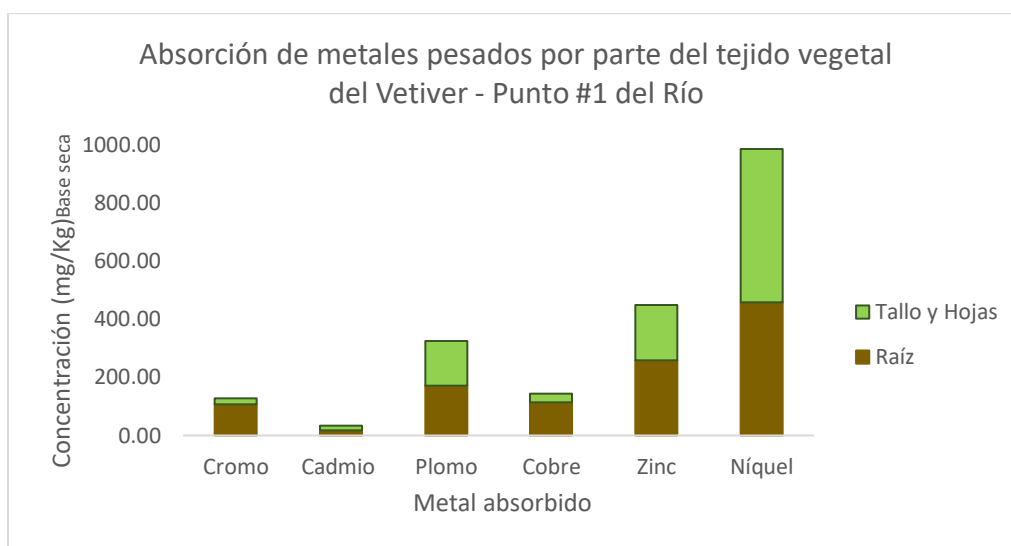


Figura 40. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbido vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #1 del río (Elaboración propia).

Tabla 26. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el punto #2 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #2 del Río - Vetiver		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	147.67	18.50
Cadmio	20.17	18.83
Plomo	199.84	156.00
Cobre	118.67	22.67
Zinc	251.51	190.67
Níquel	544.68	377.51

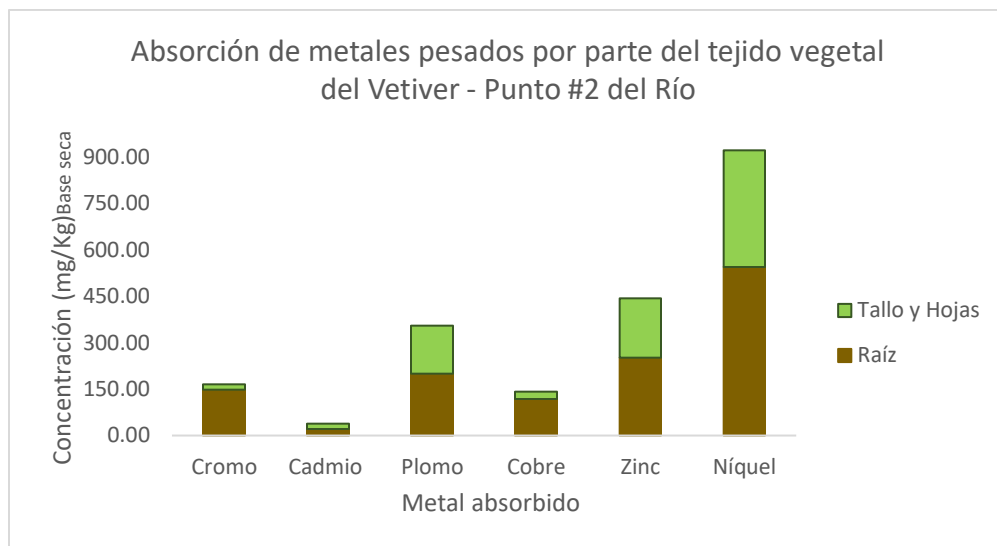


Figura 41. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #2 del río (Elaboración propia).

Tabla 27. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el punto #3 del río Prieto al final del período de exposición.

Punto #3 del Río - Vetiver		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	48.67	37.50
Cadmio	18.67	18.00
Plomo	185.84	177.84
Cobre	77.00	53.33
Zinc	397.84	230.67
Níquel	381.84	491.84

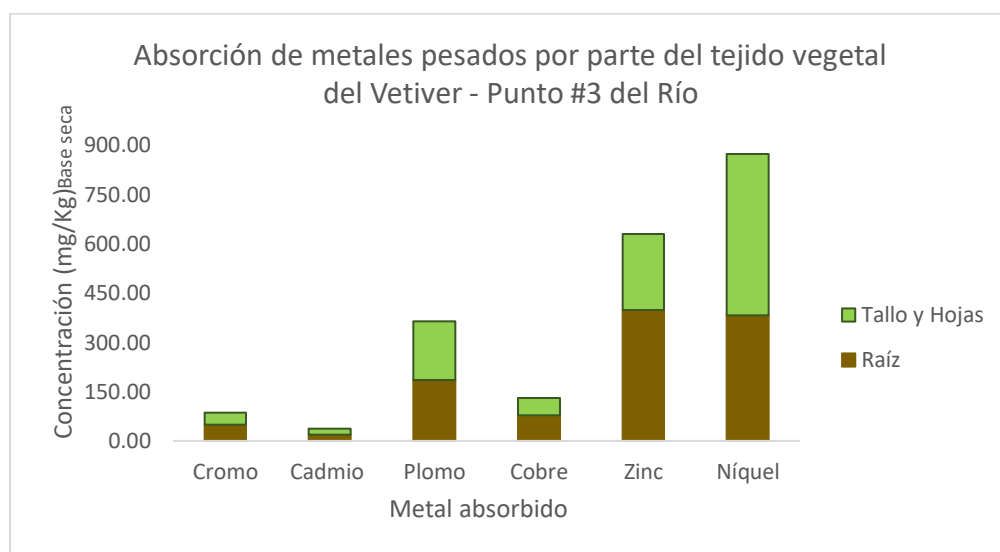


Figura 42. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el punto #3 del río (Elaboración propia).

Tabla 28. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el manantial de la iglesia al final del período de exposición.

Punto Manantial - Vetiver		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	56.17	10
Cadmio	22.5	20.17
Plomo	218.67	181.17
Cobre	274.34	29.67
Zinc	306.51	240.84
Níquel	462.84	377.17

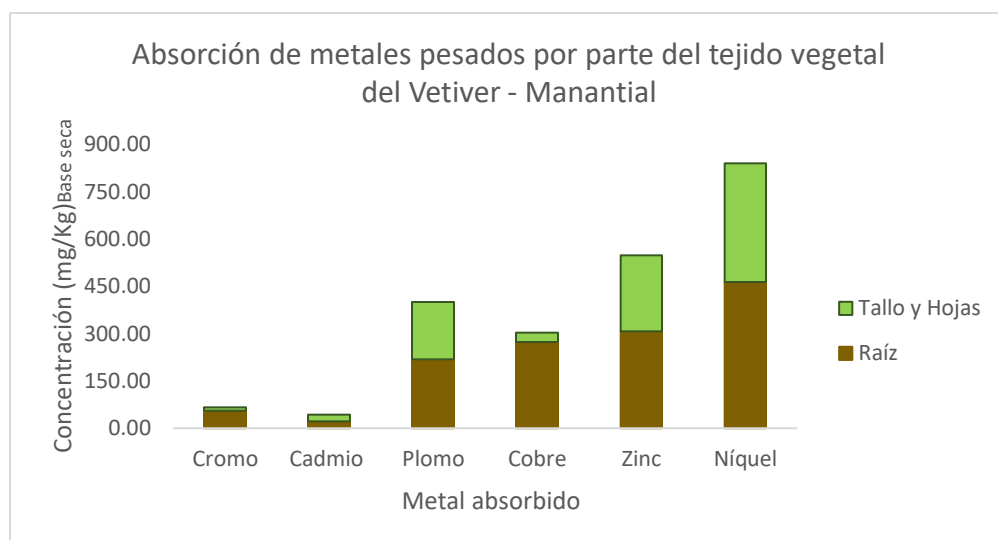


Figura 43. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el manantial de la iglesia (Elaboración propia).

Tabla 29. Concentración de metales pesados (mg/L) en la raíz y el tallo y hojas del Vetiver en el pozo de la iglesia al final del período de exposición.

Punto Pozo - Vetiver		
Metal interés	Raíz	Tallo y hojas
Cromo	62.67	5.83
Cadmio	23.50	21.83
Plomo	233	194.84
Cobre	95.34	16.50
Zinc	329.17	244.67
Níquel	446.68	428.84

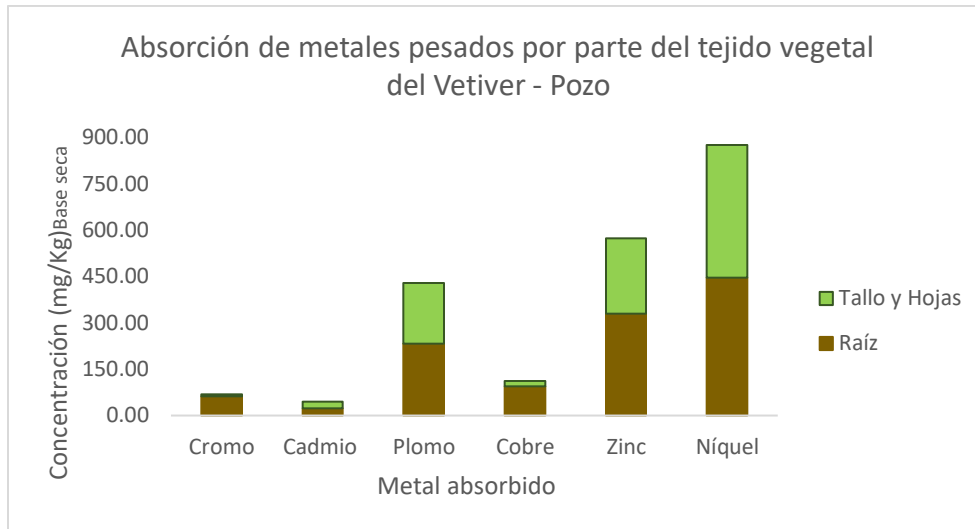


Figura 44. Gráfico comparativo de la evolución de la concentración de metales pesados absorbidos vía raíz y por el tallo y hojas del Vetiver en el pozo de la iglesia (Elaboración propia).

Al igual que con el tratamiento de lirio acuático se aplicó el estadístico T para muestras independientes ayuda a determinar que órgano vegetativo es el que tiene la capacidad de absorber una mayor cantidad de metales pesados. Los criterios utilizados para evaluar la prueba T son los siguientes:

- Se establece un intervalo de confianza del 95%.
- Un nivel de significancia α de 0.5 o 5%.
- Una hipótesis nula H_0 : ambos órganos vegetativos acumulan la misma cantidad de metales pesados.
- Una hipótesis alternativa H_1 : la raíz acumula más metales pesados que los demás órganos vegetativos.
- Para aceptar H_0 $p\text{-value} > 0.5$ de lo contrario se acepta H_1 .

```
Welch Two Sample t-test
data: Concentracion by Parte.V
t = 5.2994, df = 7.7821, p-value = 0.0003989
alternative hypothesis: true difference in means between group R and group T&H is greater than 0
95 percent confidence interval:
 1.20418      Inf
sample estimates:
 mean in group R mean in group T&H
      7.2596      5.4008
```

Figura 45. Prueba T Welch para dos muestras independientes de los órganos vegetativos con tratamiento de Vetiver.

Como se aprecia en la figura 45 el estadístico de Welch arrojó que el valor para “p” fue de 0.0003989 lo que significa que si se compara con el valor del nivel de significancia α de 0.5 se comprueba que p-value es menor a α y por tanto la hipótesis nula se rechaza siendo la afirmación de que la raíz acumula más que el tallo y las hojas.

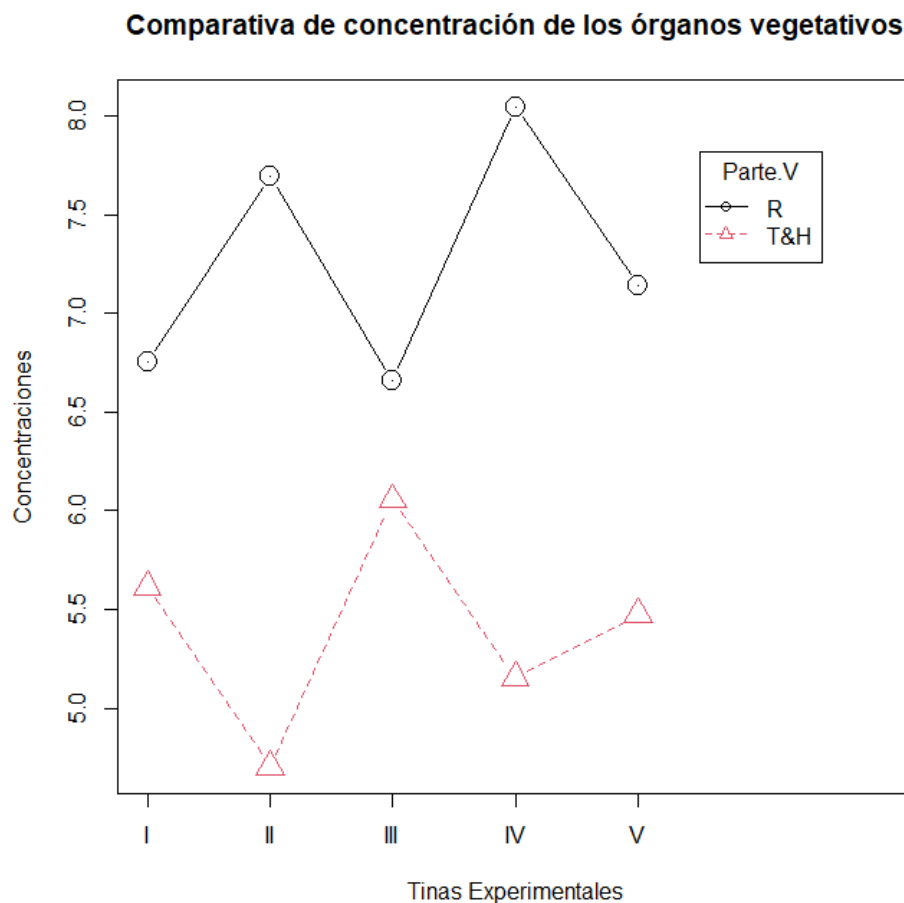


Figura 46. Gráfico de concentraciones en las partes vegetativas del Vetiver en las cinco tinajas experimentales.

Para reafirmar lo antes mencionado, la figura 46 muestra el comportamiento que tiene cada parte vegetal del vetiver cuando son aplicados a las cinco tinajas experimentales con aguas de los puntos de muestreos. Claramente, se distingue que efectivamente la raíz es la que absorbe más.

5.8. Factor de Bioconcentración (FBC)

Como bien es sabido las plantas suelen adquirir algunas estrategias cuando se trata de contrarrestar compuestos tóxicos dañinos para ellas y poder sobrevivir a su entorno (Llugany et al., 2007, citado por Medina y Montano, 2014). Para lograr dicha acción se pueden calcular ciertos factores que representan la capacidad de absorber y trasladar los compuestos tóxicos (como metales pesados) desde una parte de la planta hasta otra (Lokeshwari y Chandrappa, 2006, citado por Medina y Montano, 2014).

Para este caso el factor de bioconcentración es uno de ellos, Olivares y Peña en el 2009 citado por Medina y Montano en 2014, en definen este factor como el cociente entre la concentración de metales pesados que se encuentran en los órganos aéreos y el suelo o agua.

Existen tres escenarios posibles que definen el resultado del factor de bioconcentración de una planta.

- Primer caso: Si $FBC_{raíz} < 1$ – la planta es **exclusora**.
- Segundo caso: $1 < FBC_{raíz} < 10$ – la planta es **acumuladora**.
- Tercer caso: si $FBC_{raíz} > 10$ – la planta es **hiperacumuladora**.

(Baker, 1981; Ma, 2001; citado por Reyes, 2020).

Tabla 30. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	26.44	hiperacumuladora	21.71	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	-	-	-	-	41.18	hiperacumuladora	37.09	hiperacumuladora
180	-	-	0	exclusora	35.37	hiperacumuladora	633	hiperacumuladora	580.57	hiperacumuladora	221.06	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	119.06	hiperacumuladora	1018.77	hiperacumuladora	2270.88	hiperacumuladora	3188.16	hiperacumuladora

Tabla 31. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	27.20	hiperacumuladora	27.68	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	-	-	-	-	44.25	hiperacumuladora	60.77	hiperacumuladora
180	-	-	0	exclusora	46.49	hiperacumuladora	250.01	hiperacumuladora	553.16	hiperacumuladora	460.62	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	89.85	hiperacumuladora	420.84	hiperacumuladora	7146.8	hiperacumuladora	3340.26	hiperacumuladora

Tabla 32. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	34.36	hiperacumuladora	22.08	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	-	-	-	-	43.59	hiperacumuladora	81.55	hiperacumuladora
180	-	-	0	exclusora	47.75	hiperacumuladora	383.34	hiperacumuladora	337.37	hiperacumuladora	415.16	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	120.20	hiperacumuladora	742.87	hiperacumuladora	1430.70	hiperacumuladora	-	-

Tabla 33. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	21.43	hiperacumuladora	19.286	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	13.61	hiperacumuladora	-	-	29.89	hiperacumuladora	53.287	hiperacumuladora
180	-	-	0	exclusora	35.09	hiperacumuladora	216.67	hiperacumuladora	258.45	hiperacumuladora	378.341	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 34. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	23.99	hiperacumuladora	20.16	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	14.78	hiperacumuladora	-	-	38.24	hiperacumuladora	62.06	hiperacumuladora
180	383.34	hiperacumuladora	0	exclusora	41.45	hiperacumuladora	183.34	hiperacumuladora	445.84	hiperacumuladora	393.06	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	-	-	360.01	hiperacumuladora	3890.55	hiperacumuladora	-	-

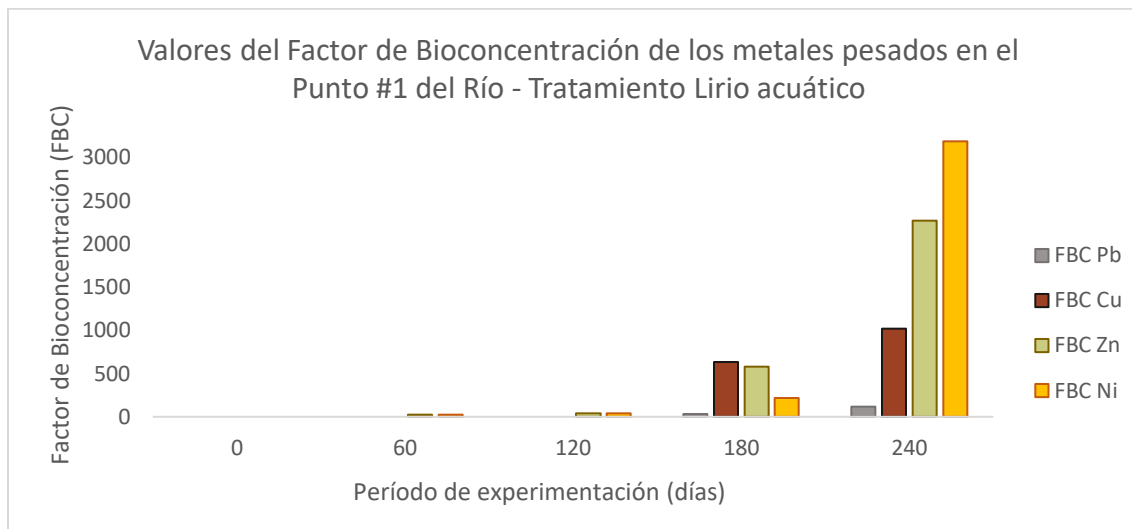


Figura 47. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

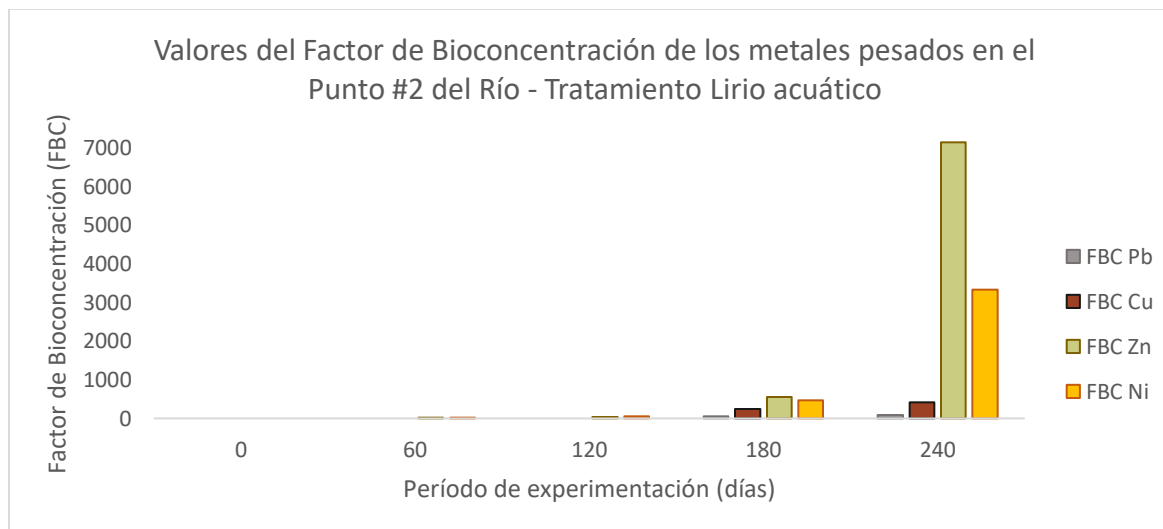


Figura 48. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

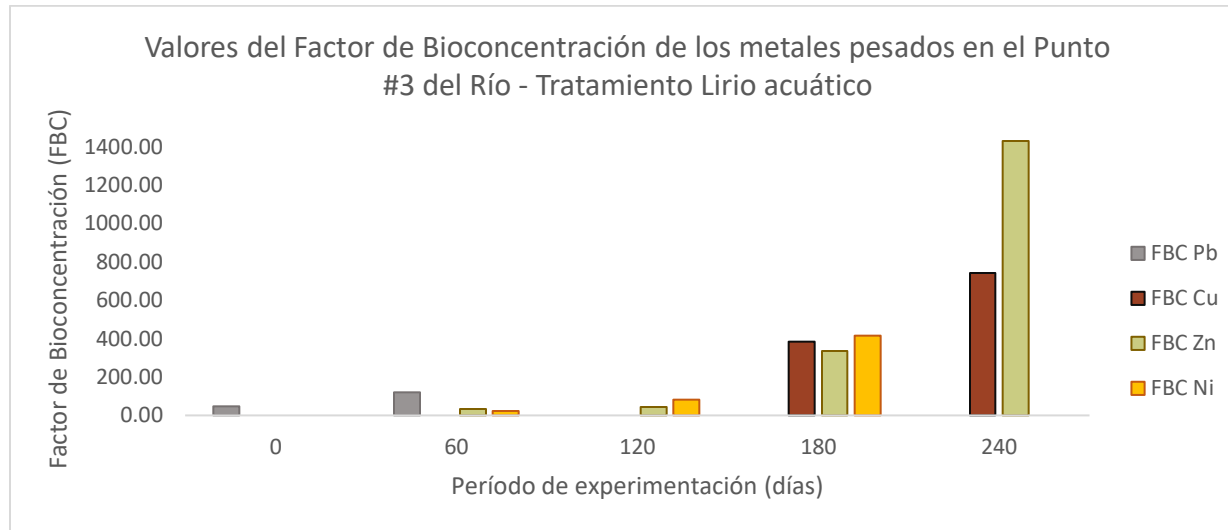


Figura 49. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

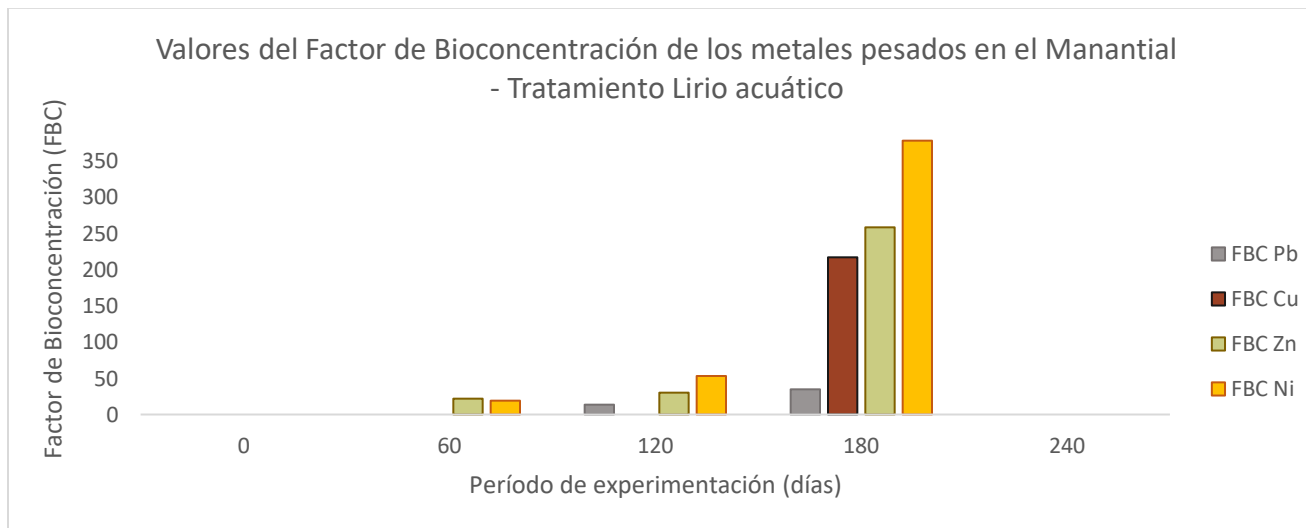


Figura 50. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

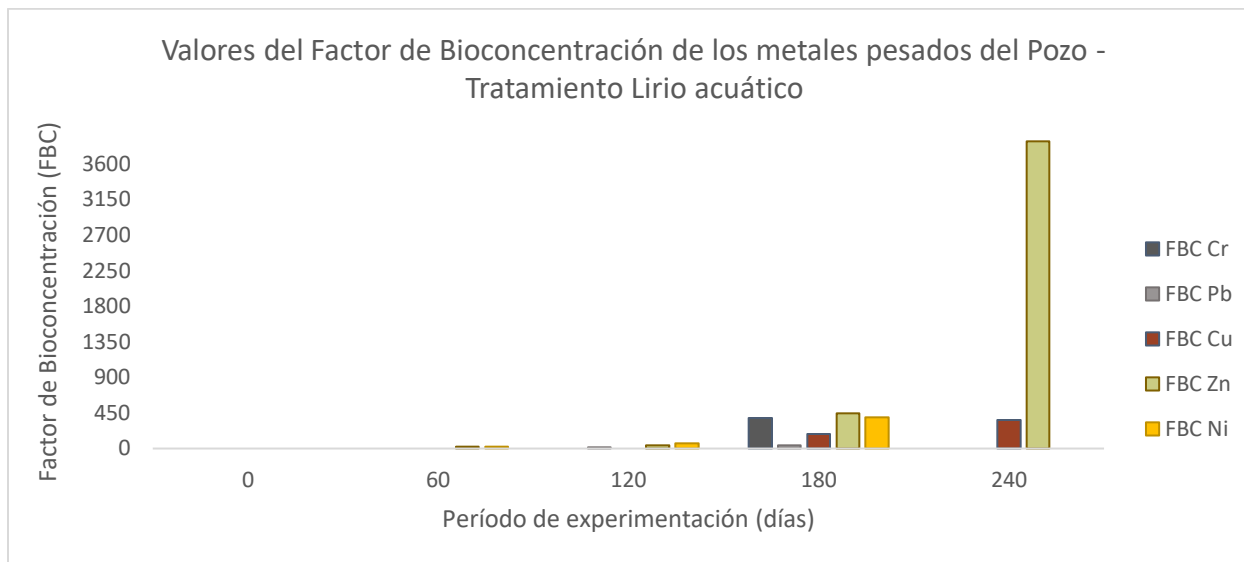


Figura 51. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

Tabla 35. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	27.79	hiperacumuladora	20.98	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	-	-	-	-	42.79	hiperacumuladora	40.99	hiperacumuladora
180	1000.02	hiperacumuladora	0	exclusora	31.30	acumuladora	500.01	hiperacumuladora	467.30	hiperacumuladora	413.64	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	166.67	hiperacumuladora	2263.38	hiperacumuladora	1178.05	hiperacumuladora	3052.28	hiperacumuladora

Tabla 36. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	24.27	hiperacumuladora	21.92	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	-	-	-	-	30.81	hiperacumuladora	39.97	hiperacumuladora
180	1233.36	hiperacumuladora	0	exclusora	33.33	hiperacumuladora	300.01	hiperacumuladora	516.68	hiperacumuladora	500.01	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	150.25	hiperacumuladora	988.91	hiperacumuladora	3143.81	hiperacumuladora	-	-

Tabla 37. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	0	exclusora	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-	29.78	hiperacumuladora	62.73	hiperacumuladora
180	383.341	hiperacumuladora	0	exclusora	34.69	hiperacumuladora	233.34	hiperacumuladora	265.45	hiperacumuladora	350.01	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	93.86	hiperacumuladora	385.01	hiperacumuladora	3978.41	hiperacumuladora	12728.03	hiperacumuladora

Tabla 38. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	26.04	hiperacumuladora	20.88	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	14.43	hiperacumuladora	-	-	39.43	hiperacumuladora	103.18	hiperacumuladora
180	-	-	0	exclusora	35.00	hiperacumuladora	64.58	hiperacumuladora	408.12	hiperacumuladora	396.98	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	-	-	-	-	1332.64	hiperacumuladora	5142.70	hiperacumuladora

Tabla 39. Factor de Bioconcentración en la raíz en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FBC Cr	Clasificación	FBC Cd	Clasificación	FBC Pb	Clasificación	FBC Cu	Clasificación	FBC Zn	Clasificación	FBC Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	exclusora	0	exclusora
60	-	-	-	-	-	-	-	-	31.42	hiperacumuladora	20.51	hiperacumuladora
120	-	-	-	-	14.89	hiperacumuladora	83.34	hiperacumuladora	38.30	hiperacumuladora	128.74	hiperacumuladora
180	450.009	hiperacumuladora	0	exclusora	35.90	hiperacumuladora	383.34	hiperacumuladora	559.63	hiperacumuladora	423.34	hiperacumuladora
240	-	-	-	-	-	-	680.97	hiperacumuladora	-	-	5583.45	hiperacumuladora

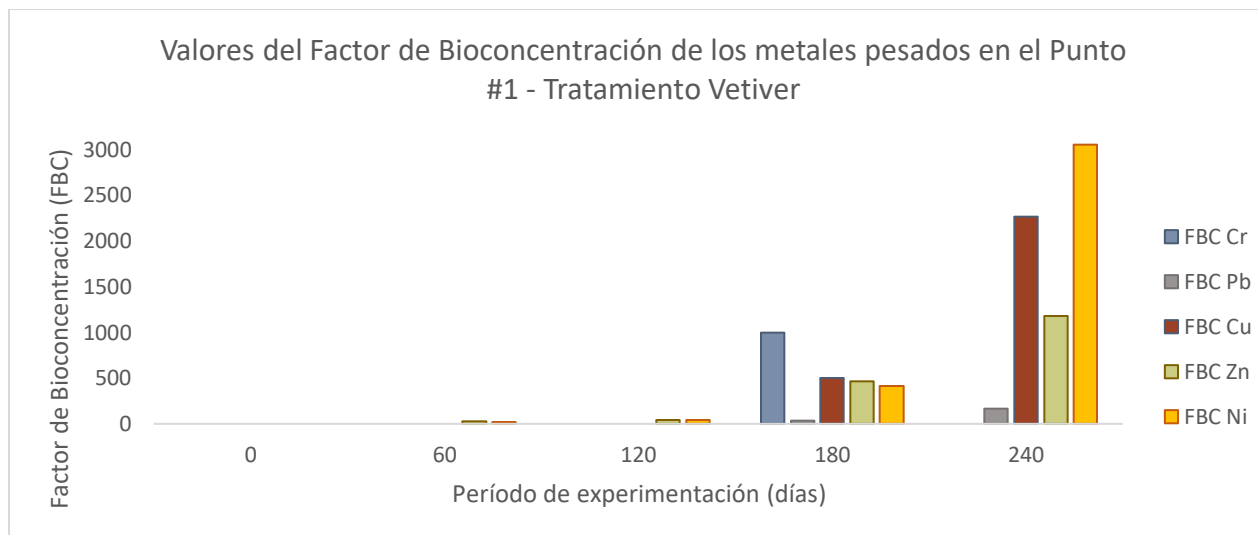


Figura 52. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

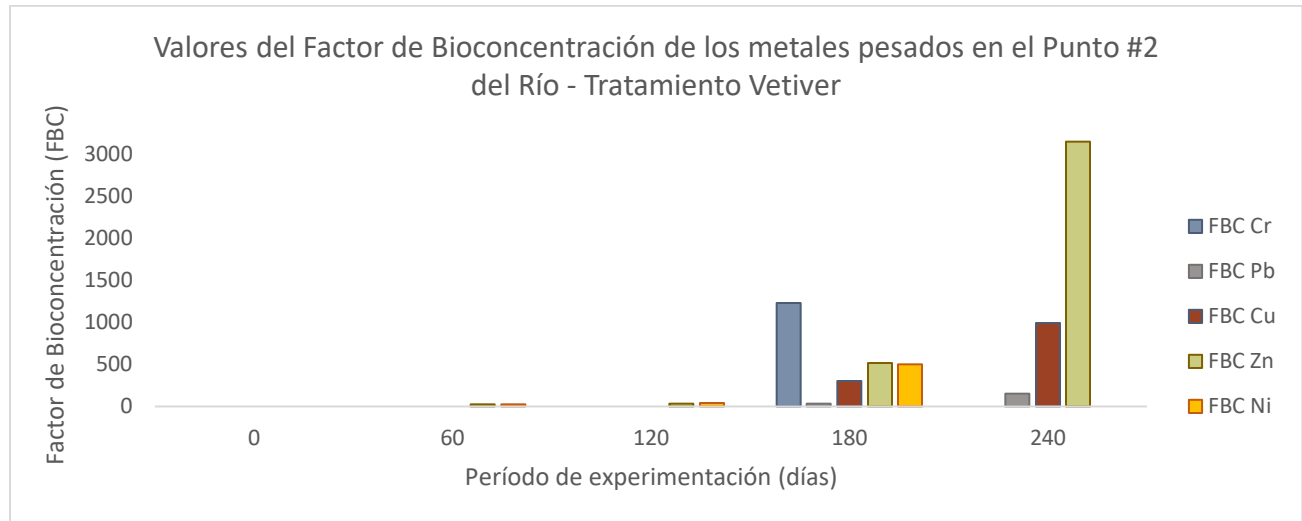


Figura 53. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

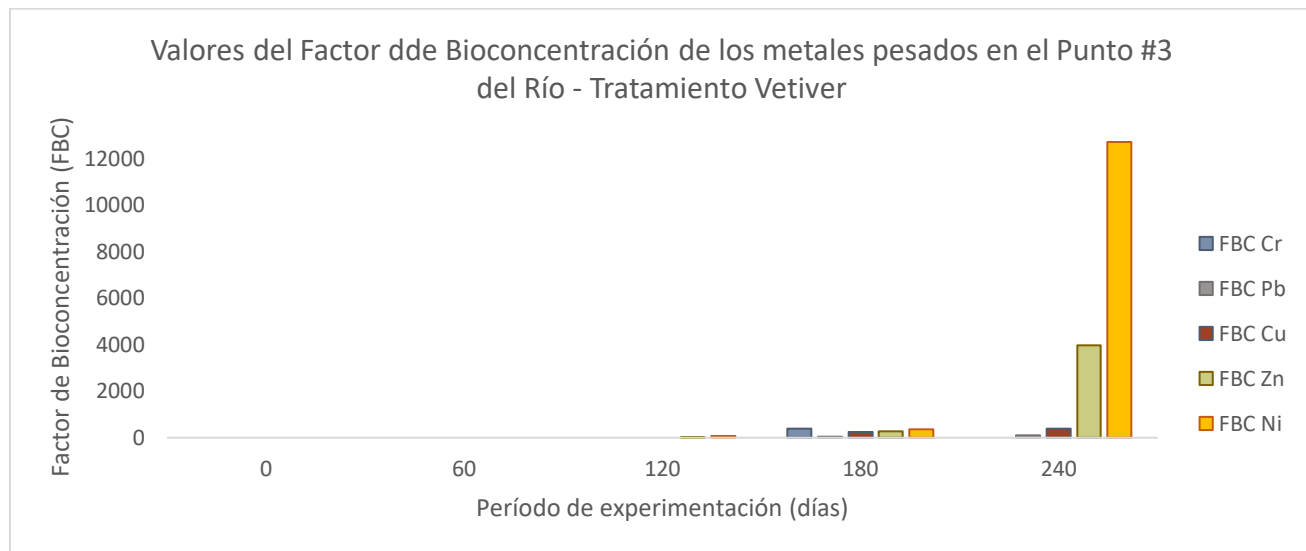


Figura 54. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

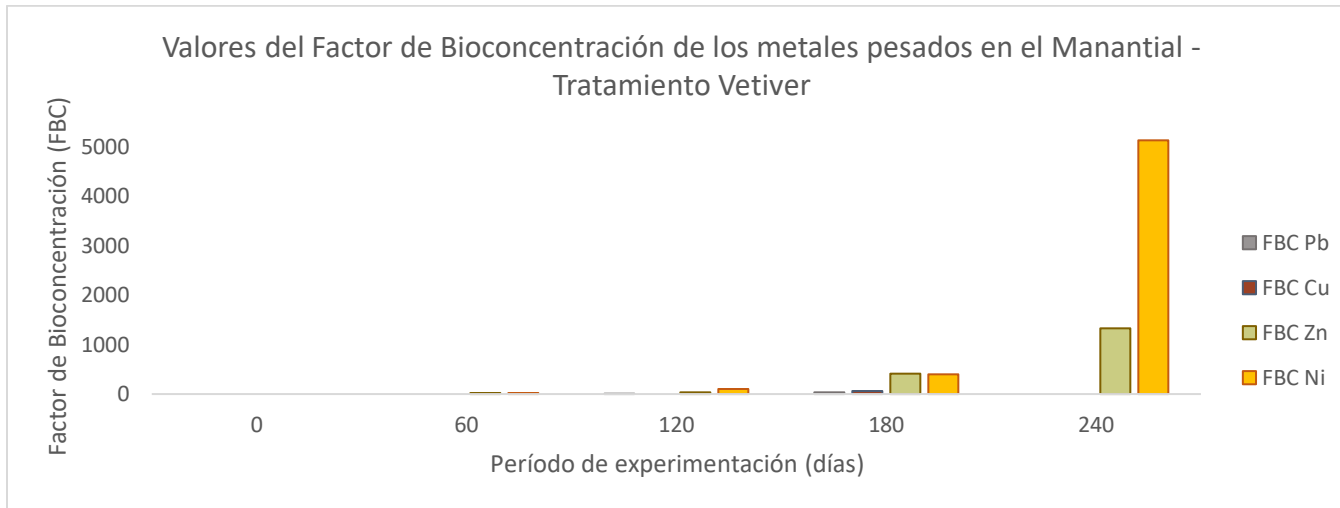


Figura 55. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

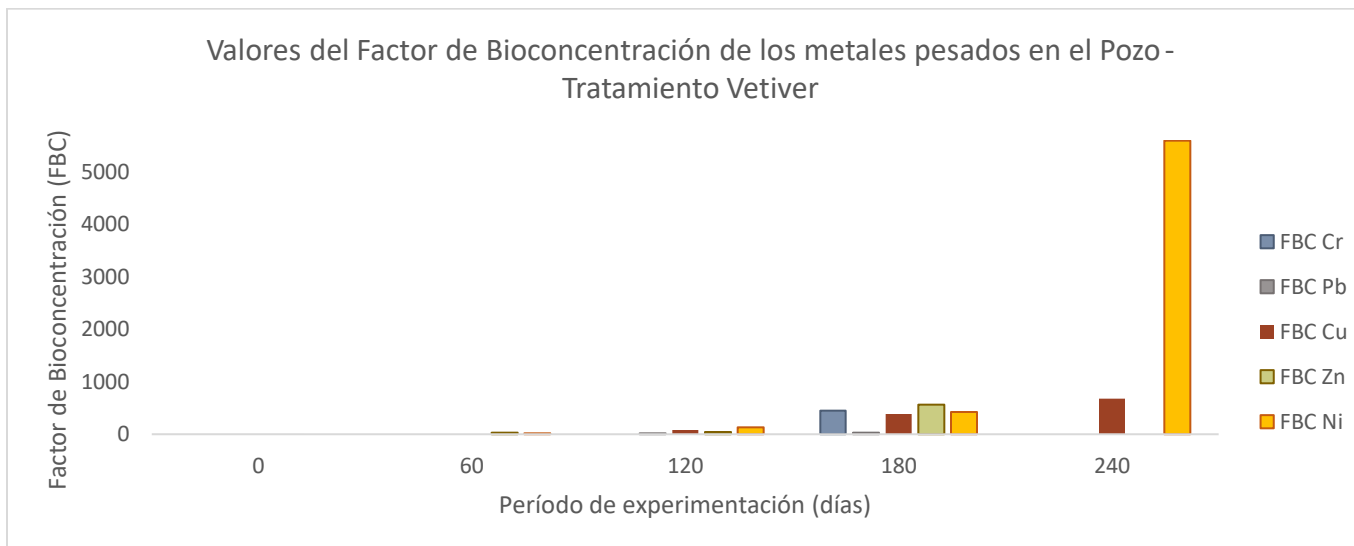


Figura 56. Gráfico comparativo del FBC de los metales pesados encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

Respecto al factor de bioconcentración obtenido por parte de *E. crassipes* (lirio acuático) se pudo comprobar que los metales pesados estudiados y encontrados en aguas del Río esta especie de planta es **hiperacumuladora** de plomo, cobre, zinc y níquel, en metales como cromo y cadmio la respuesta no fue tan favorable. En cuanto al desempeño que se tuvo en contacto con agua del manantial, el lirio acuático tuvo casi la misma respuesta, fue hiperacumuladora de 4 metales, con la excepción de que en aguas del pozo hubo presencia de cromo en el tercer período de experimentación demostrando que también es hiperacumuladora de este metal.

Ahora bien, bajo tratamiento con *C. zizanioides* (Vetiver), el factor de bioconcentración en los tres puntos de aguas del río Prieto reveló que esta planta es **hiperacumuladora** de todos los metales analizados a excepción del cadmio. El comportamiento fue el muy similar al que se presentó utilizando lirio acuático cuando vetiver estuvo expuesto a aguas del manantial y del pozo.

Como resultado ambas especies pueden ser opciones viables para trabajar con 5 de los 6 metales analizados puesto que se comprobó que tienen la capacidad de hiperacumulador este tipo de contaminantes.

5.9. Factor de Traslocación.

Otro de los factores que ayudan a medir la capacidad de absorción de metales pesados por las plantas es el factor de traslocación. Este factor es la capacidad de trasladar los contaminantes absorbidos por la raíz hacia otro órgano vegetativo ya sea el tallo, hojas, flores o semillas (Reyes, 2020).

Se calcula dividiendo la concentración del contaminante en el órgano de interés (tallo, hojas, flores, semillas o frutos) entre la concentración que se encuentra presente en la raíz de esta. Igual se presentan tres situaciones que caracterizan si la traslocación es efectiva o no:

- Si el FT es menor a 0.1 – se considera plantas exclusoras.
- Si el FT se encuentra entre 0.1 y 1 – las plantas son consideradas tolerantes.
- Si el FT es mayor a 1 – se considera acumuladoras o hiperacumuladoras.

(Mendieta y Taisgüe, 2014)

Cuando una planta obtiene un factor de traslocación que la clasifica como **exclusora** significa que ésta restringe el traslado de un metal o metales a otras partes vegetativas y lo concentra en el sistema radicular de la misma. En cambio, si el FT indica que es **tolerante** serán capaces de absorber y retener las concentraciones del metal o metales de manera proporcional tanto en la raíz como en las partes aéreas, aunque muchas veces se aprecia sintomatología que revelan toxicidad afectando el crecimiento, desarrollo y/o reproducción de la planta. Finalmente, si la planta es **acumuladora o hiperacumuladora** significará que dicha especie es tiene la capacidad de concentrar el contaminante tanto en las raíces, tallos, hojas, flores, etc. Sin limitar o restringir la funcionalidad de la planta (Baker, 1981; citado por González et al., 2020).

Tabla 40. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	exclusora	-	-	-	-	0.36	tolerante	0.94	tolerante	1	tolerante
120	0.10	exclusora	-	-	0.97	tolerante	0.5	tolerante	0.90	tolerante	1.03	hiperacumuladora o acumuladora
180	0.15	tolerante	-	-	0.97	tolerante	0.63	tolerante	0.89	tolerante	1.01	hiperacumuladora o acumuladora
240	0.14	tolerante	0.84	tolerante	0.83	tolerante	0.65	tolerante	1.46	hiperacumuladora	0.99	tolerante

Tabla 41. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	exclusora	-	-	-	-	0.14	tolerante	0.82	tolerante	0.80	tolerante
120	0.02	exclusora	-	-	0.95	tolerante	0.28	tolerante	0.76	tolerante	0.82	tolerante
180	0.02	exclusora	-	-	0.95	tolerante	0.31	tolerante	0.68	tolerante	0.81	tolerante
240	0.02	exclusora	0.77	tolerante	0.93	tolerante	0.38	tolerante	0.64	tolerante	0.73	tolerante

Tabla 42. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	exclusora	-	-	-	-	0.44	tolerante	0.77	tolerante	0.83	tolerante
120	0.02	exclusora	-	-	0.94	tolerante	0.36	tolerante	0.75	tolerante	0.98	tolerante
180	0.02	exclusora	-	-	0.74	tolerante	0.48	tolerante	0.78	tolerante	0.98	tolerante
240	0.02	exclusora	0.93	tolerante	0.73	tolerante	0.37	tolerante	0.71	tolerante	0.98	tolerante

Tabla 43. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	exclusora	-	-	-	-	0.27	tolerante	0.86	tolerante	0.98	tolerante
120	0	exclusora	-	-	1.01	acumuladora o hiperacumuladora	0.25	tolerante	0.83	tolerante	1.32	acumuladora o hiperacumuladora
180	0	exclusora	-	-	1.01	acumuladora o hiperacumuladora	0.23	tolerante	0.84	tolerante	1.32	acumuladora o hiperacumuladora
240	0	exclusora	0.94	tolerante	1.00	acumuladora o hiperacumuladora	0.17	tolerante	1.72	hiperacumuladora	1.31	hiperacumuladora

Tabla 44. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Lirio acuático.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	exclusora	-	-	-	-	0.13	tolerante	0.91	tolerante	1.18	acumuladora o hiperacumuladora
120	0	exclusora	-	-	0.95	tolerante	0.56	tolerante	0.89	tolerante	0.93	tolerante
180	0	exclusora	-	-	0.85	tolerante	0.45	tolerante	0.82	tolerante	0.93	tolerante
240	0	exclusora	0.94	tolerante	0.88	tolerante	0.31	tolerante	0.81	tolerante	0.92	tolerante

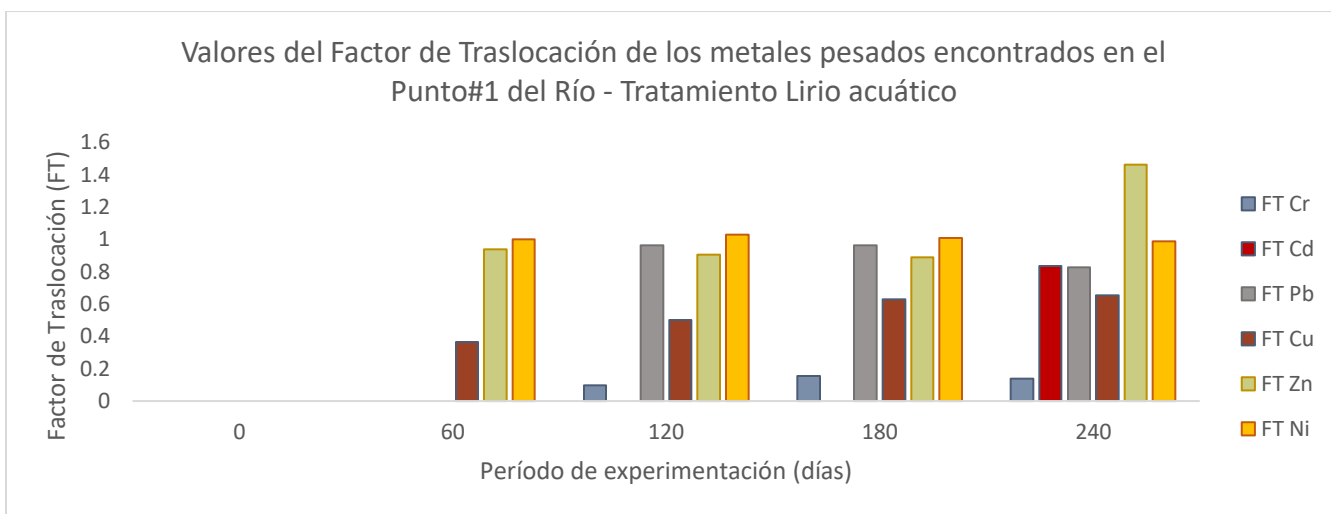


Figura 57. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Punto #1 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

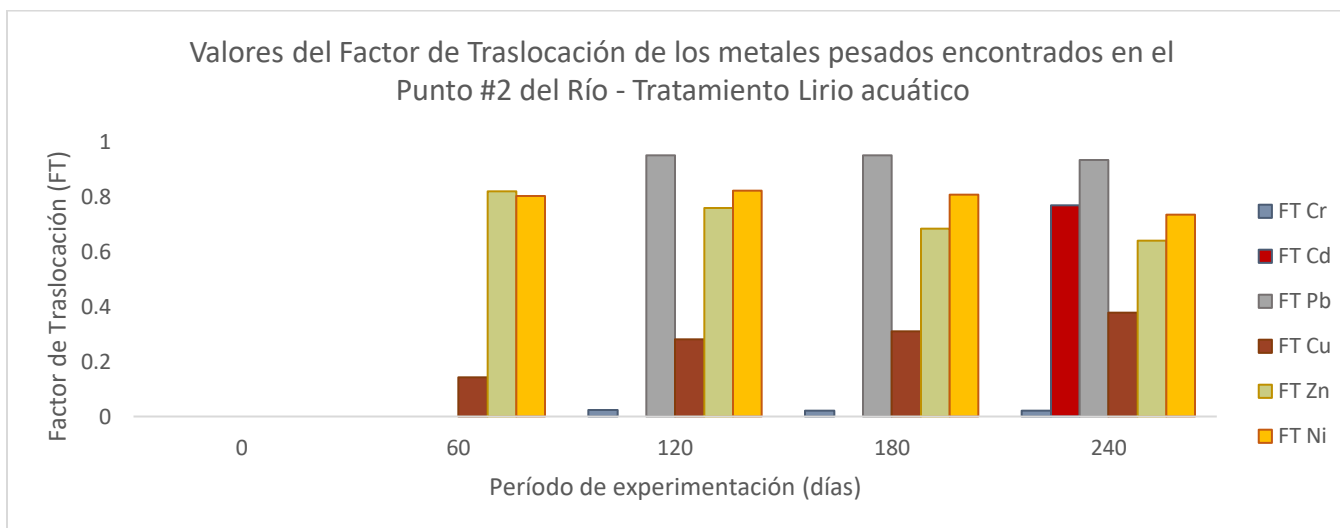


Figura 58. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #2 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

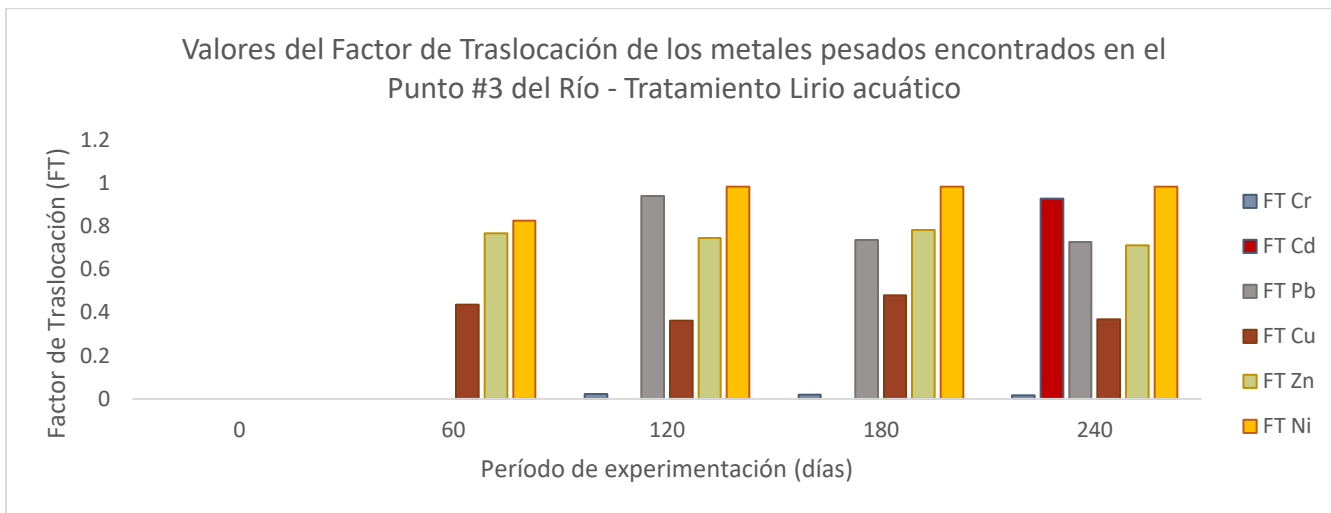


Figura 59. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Punto #3 del Río con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

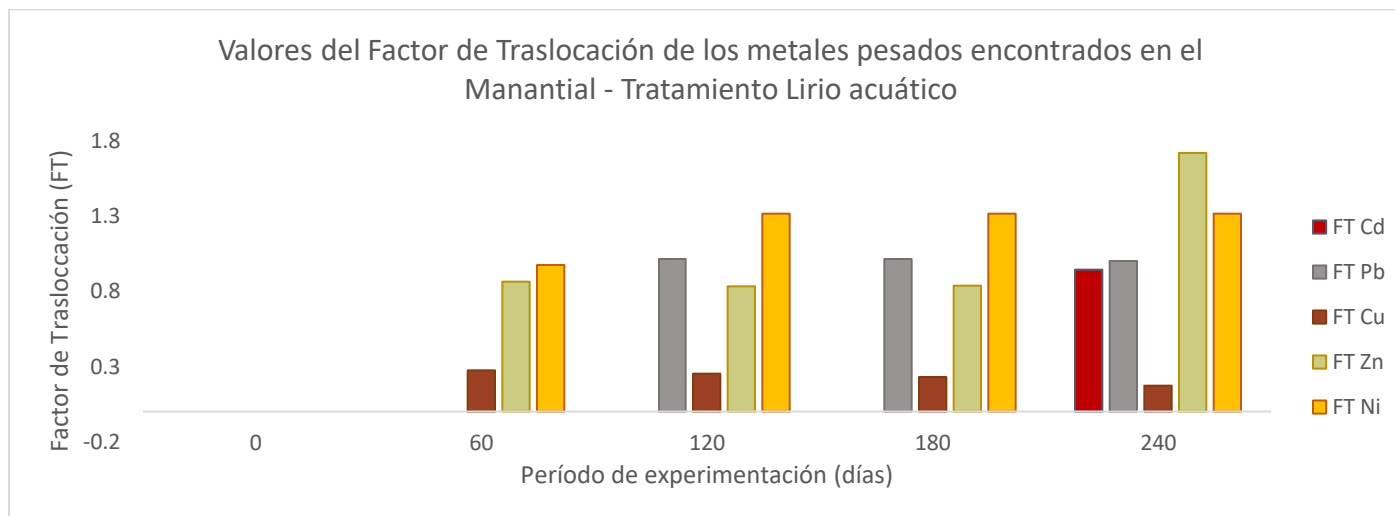


Figura 60. Gráfico comparativo del FT de los metales pesados encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia).

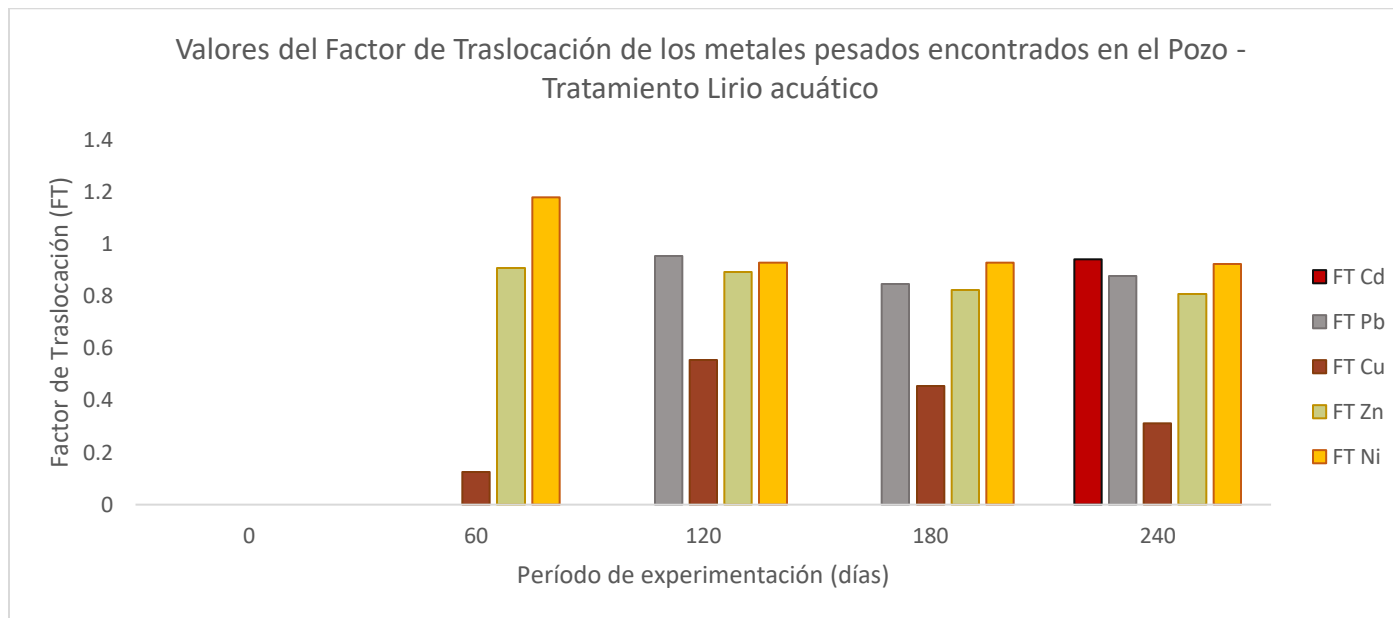


Figura 61. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Lirio acuático (Elaboración propia)

Con tratamiento de *E. crassipes* (lirio acuático) en contacto con agua de los tres puntos del río, el factor de traslocación reveló que esta planta es exclusora de cromo, de hecho varias investigaciones encontraron que este metal en específico es muy difícil de traslocar en las plantas por lo que casi siempre se localiza en el sistema radicular (Carrión *et al.*, 2012) esto se debe principalmente a que las plantas no pueden procesar el cromo de manera natural a menos que sea en su forma química trivalente (Cr III), así que el cromo hexavalente (Cr VI), que es el más tóxico y se encuentra presente en aguas contaminadas, no puede ser asimilado con facilidad; además probablemente otra de las razones se deba a que no existe una compartimentación vacuolar o transportadores específicos en la planta que sean los encargados de realizar esta tarea (Gunsé, 1987). Con respecto al cadmio, plomo, cobre, zinc y níquel en los puntos de muestreo 2 y 3 el lirio acuático tiene un factor de traslocación que indica que pueden ser tolerados, aunque con posibilidades de que puedan presentar algún signo de afectación a la planta. Únicamente en el punto #1 el lirio acuático es hiperacumuladora de níquel.

Ahora bien, el efecto resultante que tuvo el lirio acuático con el agua del manantial y el pozo fue curioso. El FT de traslocación de la planta con cromo fue el mismo presentado con el agua del río, exclusora, al igual que el cadmio, que fue tolerante. A partir de los siguiente cuatro metales el resultado fue diferente, con agua de manantial se obtuvo que:

- El FT de plomo indica que el lirio acuático es hiperacumulador, no tiene problema con distribuirlo por todo su sistema.
- El FT de zinc del lirio puede ser tanto tolerante como hiperacumulador.
- El FT de níquel del lirio acuático es hiperacumulador de este metal.

El factor de traslocación en el punto de muestreo del Pozo fue muy parecido al de las aguas del río con excepción del níquel en donde en un principio la planta se comportó como hiperacumuladora y después de 2 meses volvió a ser tolerante, esto probablemente a diversos factores externos no controlables.

Tabla 45. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #1 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.31	tolerante	-	-	-	-	0.19	tolerante	0.79	tolerante	0.99	tolerante
120	0.19	tolerante	-	-	0.99	tolerante	0.23	tolerante	0.77	tolerante	1.11	acumuladora o hiperacumuladora
180	0.2	tolerante	-	-	0.99	tolerante	0.27	tolerante	0.75	tolerante	1.16	acumuladora o hiperacumuladora
240	0.2	tolerante	0.91	tolerante	0.89	tolerante	0.27	tolerante	0.73	tolerante	1.15	acumuladora o hiperacumuladora

Tabla 46. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #2 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.05	excluyente	-	-	-	-	0.14	tolerante	0.88	tolerante	0.66	tolerante
120	0.06	excluyente	-	-	0.97	tolerante	0.17	tolerante	0.86	tolerante	0.73	tolerante
180	0.05	excluyente	-	-	0.97	tolerante	0.17	tolerante	0.81	tolerante	0.71	tolerante
240	0.13	tolerante	0.934	tolerante	0.78	tolerante	0.19	tolerante	0.76	tolerante	0.69	tolerante

Tabla 47. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo #3 del Río - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	0.95	tolerante	-	-	0.97	tolerante	1.15	acumuladora o hiperacumuladora	1.08	acumuladora o hiperacumuladora	1.38	acumuladora o hiperacumuladora
180	0.91	tolerante	-	-	0.97	tolerante	0.86	tolerante	1.01	acumuladora o hiperacumuladora	1.36	acumuladora o hiperacumuladora
240	0.77	tolerante	0.96	tolerante	0.96	tolerante	0.69	tolerante	0.58	tolerante	1.29	acumuladora o hiperacumuladora

Tabla 48. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Manantial - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	excluyente	-	-	-	-	0.41	tolerante	0.81	tolerante	0.93	tolerante
120	0.2	tolerante	-	-	1	tolerante	0.10	tolerante	0.81	tolerante	0.86	tolerante
180	0.17	tolerante	-	-	1	tolerante	0.10	excluyente	0.78	tolerante	0.85	tolerante
240	0.18	tolerante	0.90	tolerante	0.83	tolerante	0.11	tolerante	0.79	tolerante	0.81	tolerante

Tabla 49. Factor de Traslocación en el Punto de Muestreo del Pozo - Tratamiento Vetiver.

Período (días)	FT Cr	Clasificación	FT Cd	Clasificación	FT Pb	Clasificación	FT Cu	Clasificación	FT Zn	Clasificación	FT Ni	Clasificación
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0	excluyente	-	-	-	-	0.18	tolerante	0.80	tolerante	0.82	tolerante
120	0	excluyente	-	-	1	tolerante	0.36	tolerante	0.92	tolerante	1.14	hiperacumuladora acumuladora o hiperacumuladora
180	0	excluyente	-	-	1	tolerante	0.20	tolerante	0.83	tolerante	1.004	hiperacumuladora
240	0.09	excluyente	0.93	tolerante	0.84	tolerante	0.17	tolerante	0.74	tolerante	0.96	tolerante

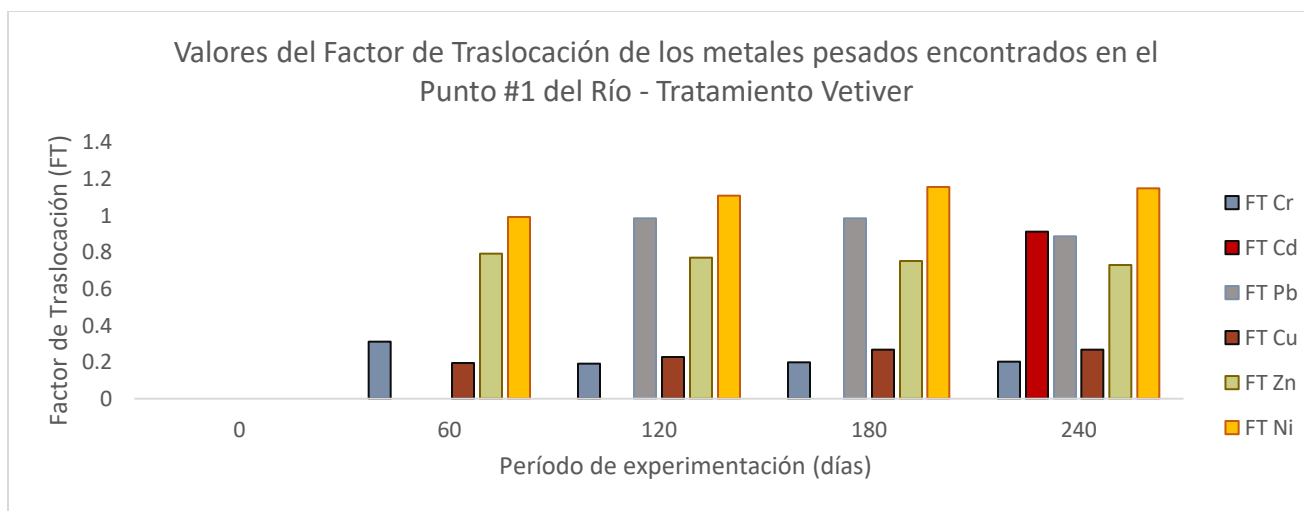


Figura 62. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #1 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

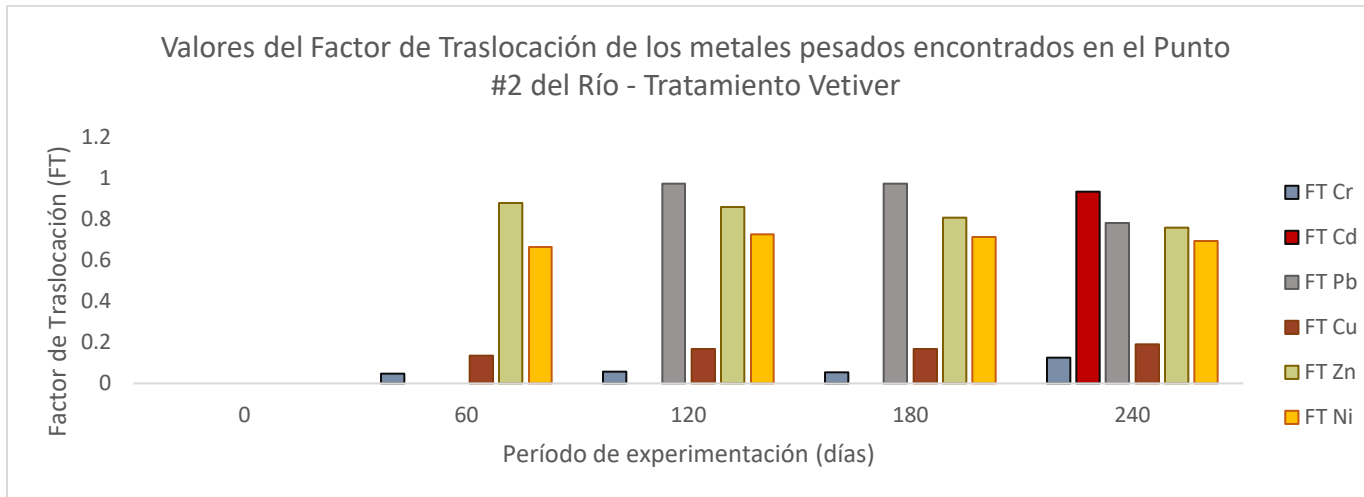


Figura 63. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #2 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

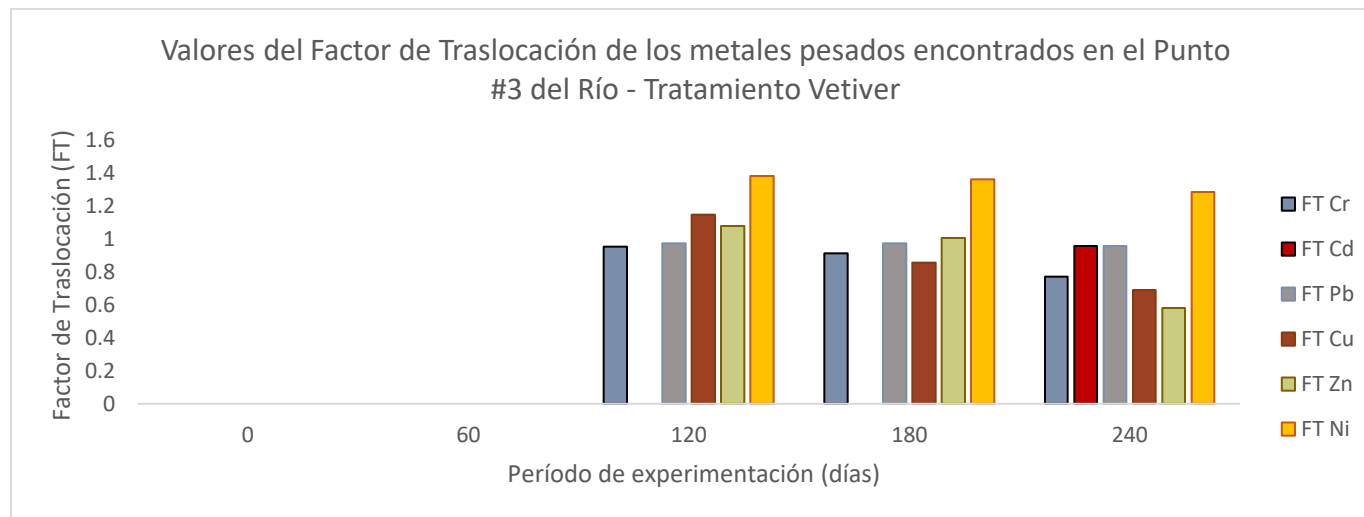


Figura 64. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del punto #3 del Río con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

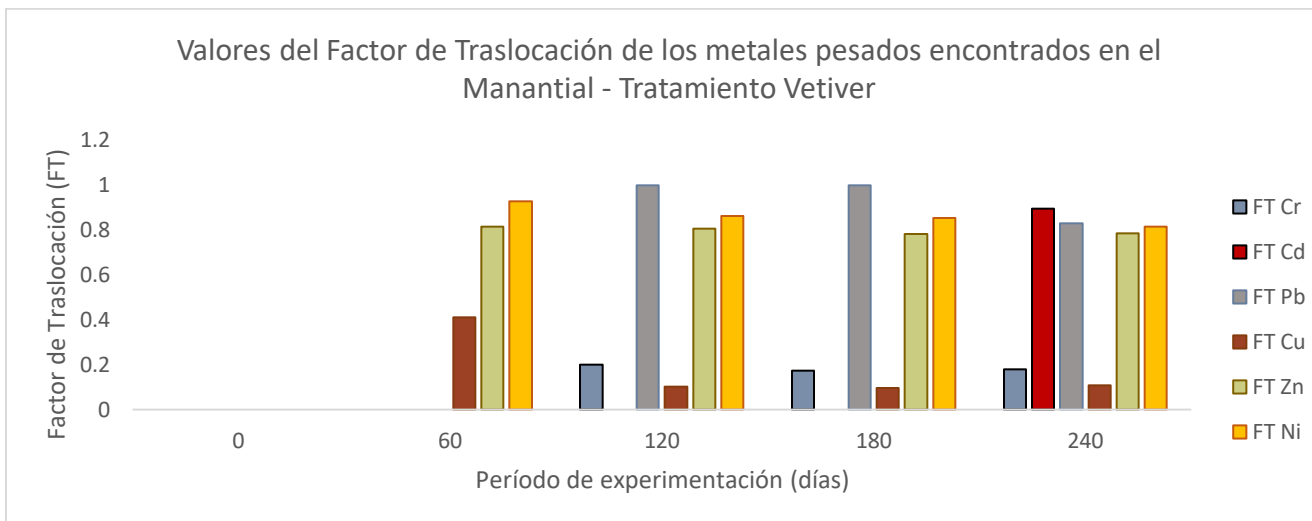


Figura 65. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Manantial con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

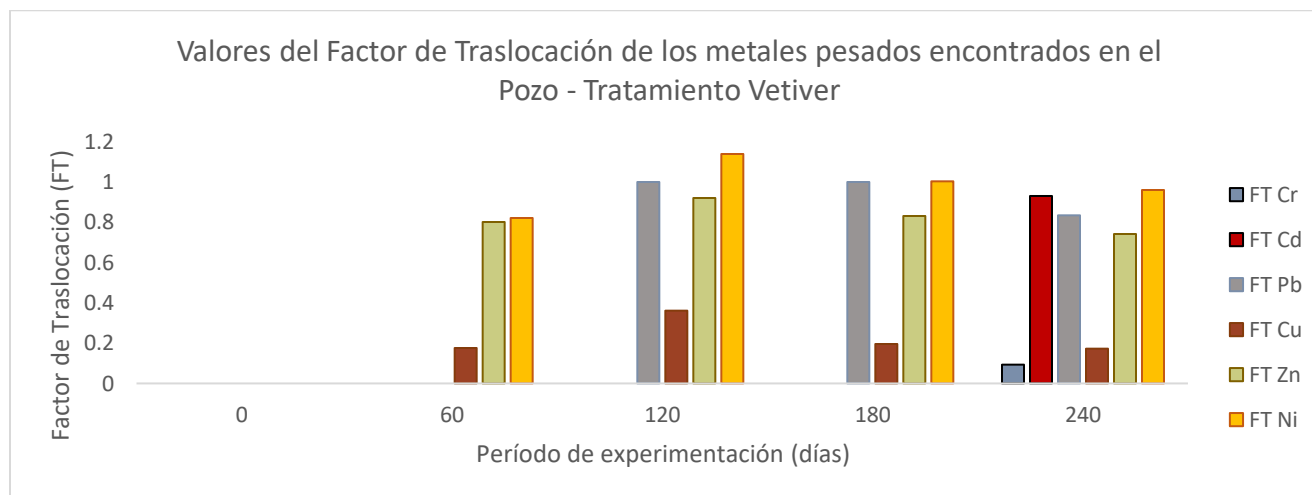


Figura 66. Gráfico comparativo del FT de los metales encontrados en aguas del Pozo con tratamiento de Vetiver (Elaboración propia).

De acuerdo con los resultados obtenidos con tratamiento de **C. zizanioides** (vetiver), el factor de traslocación (FT) con esta planta indicó que:

- en el punto #1 del río, es tolerante con cromo, cadmio, plomo, cobre y zinc. Únicamente con níquel el vetiver actuó como hiperacumulador.
- en el punto #2 del río, fue excluyente de cromo como en casos anteriores y tolerante con los siguientes 5 metales analizados.
- en el punto #3 del río, fue tolerante con cromo, cadmio y plomo. En el caso del zinc y níquel, el vetiver tuvo un FT de hiperacumulador.
- con aguas de manantial, el factor de traslocación para todos los metales analizados fue considerado como tolerante.
- con aguas del pozo, indicó que para cromo el vetiver es excluyente, para cadmio, plomo, cobre y zinc es tolerante y únicamente con níquel esta planta tiene un factor de traslocación de tipo hiperacumulador.

5.10. Eficiencia de remoción de metales pesados

Las tasas de remoción presentadas en esta sección son las tasas globales obtenidas desde el comienzo del experimento (día 0) hasta que transcurrieron los 240 días estipulados, aquí se puede observar la comparativa de los resultados obtenidos de cada planta. Los valores por cada período de tratamiento se encuentran desplegados en el **Anexo C**.

Tabla 50. Tasa de remoción de metales pesados con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver en aguas del punto de muestreo #1 del Río.

Parámetro	Lirio acuático			Vetiver		
	Período (días)		% Remoción	Período (días)		% Remoción
	0	240		0	240	
Cromo (Cr)	0.0	0	100	0.09	0	100
Cadmio (Cd)	2.45*	0	100	2.39*	0	100
Plomo (Pb)	10.7*	1.6	85.04	4.2*	1.03	75.48
Cobre (Cu)	0.6	0.08	86.67	0.6	0.05	91.67
Zinc (Zn)	7.61	0.12	98.42	7.61	0.22	97.11
Níquel (Ni)	17.2	0.14	99.19	17.2	0.15	99.13

* momento en el que apareció el metal en el agua.

Tabla 51. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo #2 del Río.

Parámetro	Lirio acuático			Vetiver		
	Período (días)		% Remoción	Período (días)		% Remoción
	0	240		0	240	
Cromo (Cr)	0.3	0	100	0.03	0	100
Cadmio (Cd)	2.46*	0	100	2.56*	0	100
Plomo (Pb)	11.5*	2.02	82.43	11.5	1.33	88.43
Cobre (Cu)	1.9**	0.24	87.36	1.9**	0.12	93.68
Zinc (Zn)	6.44	0.05	99.22	6.44	0.08	98.76
Níquel (Ni)	16.3	0.17	98.96	16.3	0	100

* momento en el que apareció el metal en el agua.

** concentración tomada a partir de la reaparición (6 meses después de iniciado el experimento) puesto que la concentración original fue removida al 100% después de 4 meses.

Tabla 52. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo #3 del Río.

Parámetro	Lirio acuático			Vetiver		
	Período (días)		% Remoción	Período (días)		% Remoción
	0	240		0	240	
Cromo (Cr)	0.2	0	100	0.2	0	100
Cadmio (Cd)	3.66*	0	100	2.49*	0	100
Plomo (Pb)	11.5*	1.51	86.87	11.5*	1.98	82.78
Cobre (Cu)	176.7	0.14	99.92	176.7	0.2	99.88
Zinc (Zn)	6.84	0.25	96.35	6.84	0.1	98.54
Níquel (Ni)	18.3	0	100	18.3	0.03	99.84

* momento en el que apareció el metal en el agua.

Tabla 53. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo del manantial.

Parámetro	Lirio acuático			Vetiver		
	Período (días)		% Remoción	Período (días)		% Remoción
	0	240		0	240	
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-
Cadmio (Cd)	0.9*	0	100	0.8*	0	100
Plomo (Pb)	12.4*	0	100	11.5*	0	100
Cobre (Cu)	0	0	-	0	0	-
Zinc (Zn)	7.35	0	100	7.35	0.23	96.87
Níquel (Ni)	21.3	0	100	21.3	0.09	99.58

* momento en el que apareció el metal en el agua.

Tabla 54. Tasa de remoción con tratamiento de Lirio acuático y Vetiver para aguas del punto de muestreo del pozo.

Parámetro	Lirio acuático			Vetiver		
	Período (días)		% Remoción	Período (días)		% Remoción
	0	240		0	240	
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-
Cadmio (Cd)	0.8*	0	100	0.7*	0	100
Plomo (Pb)	13.9*	0	100	12.3*	0	100
Cobre (Cu)	1.2*	0.15	87.5	1.7*	0.14	91.76
Zinc (Zn)	7.35	0.07	99.05	7.35	0	100
Níquel (Ni)	21.3	0	100	21.3	0.08	99.62

* momento en el que apareció el metal en el agua.

Observando las tasas de rendimiento de los metales pesados presentes en el punto #1 del río, los porcentajes de remoción son muy parecidos, pero utilizando tratamiento con *E. crassipes* la absorción fue ligeramente mayor, 94.88% de remoción general (es decir, una concentración global con todos los metales pesados) en comparación con *C. zizanioides* (93.89% de remoción general).

Para el caso de los resultados obtenidos en el punto #2 del río se distingue perfectamente que el tratamiento que mejor favoreció la eliminación de las concentraciones encontradas en un inicio (o al momento de su aparición durante el experimento) fue con la utilización de *Chrysopogon zizanioides* (vetiver).

Pasa lo mismo con las tasas de rendimiento del punto #3 del río y el agua del manantial, es muy destacado cuál de las dos plantas tuvo un mejor desempeño en el tratamiento del agua, aquí fue *Eichhornia crassipes* (lirio acuático).

Finalmente, con el agua de pozo, la planta que mejor tuvo resultados de absorción y remoción de metales pesados fue el *C. zizanioides* (vetiver).

CONCLUSIONES

Se detectó la presencia de cromo, cobre, zinc y níquel en una primera instancia en aguas del Río Prieto y de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana 001 de SEMARNAT más actualizada (2021) las concentraciones de los primeros 3 metales estuvieron dentro de lo estipulado por la normativa a excepción de la cantidad encontrada de níquel en todas las muestras analizadas. En el punto de muestreo #3 del río la concentración de cobre (176.7 mg/L) rebasó los límites máximos permisibles al día (5 mg/L) y al mes (4 mg/L). En cuanto a los metales que se encontraron en las muestras de agua procedentes del manantial y pozo de la iglesia solo estuvieron presentes zinc y níquel siendo este último compuesto el que rebasó ambas concentraciones máximas permitidas (diarias y mensuales).

Un caso peculiar fue el plomo y cadmio los cuales no estuvieron presentes en las muestras de agua de los dos cuerpos acuáticos pero que debido a factores externos no controlables surgieron a mediados y finales del proceso de tratamiento con lirio acuático y vetiver. En ambos casos las concentraciones medidas sobrepasaron los 1.25 mg/L diario y 1 mg/L mes de plomo (obteniendo concentraciones entre 3.7 - 9.4 mg/L) y de 0.3 mg/L diario y 0.2 mg/L mes del cadmio (concentraciones encontradas entre 0.7 - 0.9 mg/L).

Las encuestas realizadas a la población de la comunidad de Sta. Bárbara Almoloya proporcionaron información respecto a los antecedentes de la situación de los dos cuerpos de agua analizados en la zona, dando como resultado que cerca del 80% de los encuestados determinó que tanto el Río y el Manantial hace 30 años se encontraban limpios y que las industrias son las principales causantes de la contaminación del Río, en especial la empresa Ilsa que se ubica en el municipio de Coronango. Además de que el 56.7% de las personas que realizaron la encuesta expusieron que la postura del gobierno con respecto a los temas medioambientales es deplorable y desinteresado siendo ese el principal motivo por el cual no se han tomado cartas en el asunto para llevar a cabo una restauración en el río.

Por otro lado, se concluye con base en la información presentada sobre la concentración absorbida tanto por *E. crassipes* (lirio acuático) como por *C. zizanioides* (vetiver) que el *órgano vegetativo que posee mayor capacidad para almacenar metales pesados presentes en aguas contaminadas en general es la raíz*, resultando que en contacto con **romo** existe una absorción por parte de este órgano de entre **80.99% y 96.83%**, con **cadmio** entre **52.99% y 56.55%**, con plomo de **52.94% a 53.89%**, **cobre** entre **73.58% y 79.50%**, **zinc** con valores entre los **50.43% y 58.26%** y el níquel puede llegar a acumular porcentajes que van de **50.71% a 51.08%** siendo el metal con la mayor tendencia a que exista una igualdad entre la concentración que almacena en la raíz y el tallo y hojas.

Es importante destacar que no siempre es el caso en que el sistema radicular sea el que mayor concentración de metales pesados remueva del medio contaminado puesto que va a depender mucho del metal absorbido y la planta utilizada. Por ejemplo, en el punto de muestreo #1 del río utilizando lirio acuático el tallo y las hojas de este absorbieron 59.4% más compuesto que la raíz (40.6%), en aguas del manantial con la misma planta hubo una mayor retención de plomo, zinc y níquel por parte de los órganos vegetativos superiores que de los inferiores (52.85%, 63.19% y 56.69% respectivamente). Por su parte el vetiver solamente presentó este compartimiento con níquel en los puntos de muestreo #1 y #3 del río con 53.5% y 56.30% en tallo y hojas respectivamente.

El factor de bioconcentración de *Eichhornia crassipes* reveló que esta planta es hiperacumuladora de 4 de los 6 metales analizados (plomo, cobre, zinc y níquel) concordando con los hallazgos encontrados en las investigaciones de Parra en 2017, Carrión *et al.* en 2012 y Contreras en 2010. En comparación con *Chrysopogon zizanioides* la respuesta que tuvo esta especie en contacto con las 5 muestras analizadas indicó que es hiperacumuladora de 5 de los 6 metales encontrados (romo, plomo, cobre, zinc y níquel) lo que también se asemeja a los descubiertos por Roongtanakiat en 2010 donde el vetiver utilizado en medios contaminados en Tailandia reveló que hiperacumula cantidades considerables de

Pb, Cd y Zn. En este aspecto, la presente investigación aportó resultados considerables respecto al desempeño que puede generar el uso del *Chrysopogon zizanioides* en ambientes acuáticos contaminados debido a que casi todas las investigaciones realizadas son sobre medios terrestres.

Hablando del factor de traslocación obtenido por ambas especies se descubrió que tanto ***E. crassipes* como *C. zizanioides* pueden ser utilizados como fitoestabilizadores en cuerpos de agua contaminados con cromo** debido a su alta capacidad de absorción por parte de sus sistemas radiculares. Tratándose de cadmio, plomo, cobre y zinc pueden ser tolerados por ambas especies de plantas, aunque dependiendo de las condiciones del medio en el que se encuentren pueden llegar a presentar sintomatología de toxicidad, como fue el caso de *E. crassipes*. El caso del níquel fue la excepción ya que este metal fue procesado de manera eficiente (FT mayor a 1: hiperacumulador) por toda la estructura de la planta.

Finalmente, las tasas de rendimiento de cada tratamiento estuvieron muy cerradas en el sentido de que hubo muy poca diferencia entre el porcentaje de remoción que tenía *E. crassipes* y *C. zizanioides*. De manera más global se puede concluir que para trabajar en ambientes acuáticos contaminados con cromo y cadmio cualquiera de las 2 especies son muy útiles puesto que al final lograron una remoción del 100%, si se trata de un medio contaminado con plomo o con zinc la opción más viable es la utilización de *E. crassipes* dado que obtuvo una remoción del 90.87% y 98.61% respectivamente. Para el caso del cobre y níquel la opción ideal es aplicar tratamiento con *C. zizanioides* debido a que su respuesta fue ligeramente superior al de *E. crassipes*, 94.25% para cobre y 99.634% para níquel.

REFERENCIAS

- Águilar Juárez, B. (2021). Santa Bárbara Almoloya y sus Manantiales. *El Quetzal*. Recuperado el 10 de Febrero de 2021, de <https://www.elquetzaldecholula.com/santa-barbara-almoloya-y-manantiales/>
- Alba, F., & Martín Ceron, J. (2019). *En contexto: los ríos revueltos, radiografía de la contaminación*. México: Centrod de Estudios Sociales y de Opinión Pública de la Cámara de Diputados.
- Alfonso González, D., Reyes Fernández, R., Rodríguez Alonso, D., & Menéndez Álvarez, E. (18 de junio de 2020). Plantas que acumulan metales, su importancia. *Leucocroton havanensis* Borhidi hiperacumuladora de níquel. *Revista Investigaciones ULCB*, 6(2), 07-18. doi:<https://doi.org/10.36955/RIULCB.2019v6n2.001>
- Álvarez, I. (2017). *Día Mundial del Agua: como afectan las aguas residuales a los refugiados*. Obtenido de Acción contra el Hambre: <https://www.accioncontraelhambre.org/es/te-contamos/actualidad/dia-mundial-del-agua-como-afectan-las-aguas-residuales-los-refugiados#:~:text=La%20mala%20gesti%C3%B3n%20de%20estas,de%20aguas%20contaminadas%20por%20excrementos>
- Andrade, O. (s.f.). *El pasto vetiver: una planta para el control de la erosión y la protección ambiental*. Recuperado el 17 de abril de 2022, de Universidad Agrícola: <https://universidadagricola.com/vetiver-proteccion-ambiental/>
- Appentoth, J. (2010). Definition of "Heavy Metals" and Their Role in Biological Systems. *Franciszek Górski Institute of Plant Physiology, Polish Academy of Science, Acta Physiol Plant*(32), 615-619. doi:10.1007/978-3-642-02436-8_2
- Argota Pérez, G., Encina Cáceres, M., Argota Coello, H., & Iannacone, J. (2014). *Coficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *Alopecurus magellanicus bracteatus**. Recuperado el 26 de Febrero de 2021
- Barceló, L. D., & López Aldana, M. J. (2006). Contaminación y Calidad química del agua: problema de los contaminantes emergentes. *Panel Científico - Técnico de Seguimiento de la Política de Aguas*. Barcelona. Recuperado el 27 de Noviembre de 2020
- Bruni, S., & Mcleskey, D. (2013). *Phytoremediation*. Obtenido de Geo Engineer: <https://www.geoengineer.org/education/web-class-projects/cee-549-geoenvironmental-engineering-winter-2013/assignments/phytoremediation>
- Carrión, C., Ponce-de León, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (agosto de 2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*, 46(6), 609-620.
- Casiano Tlahque, J. F. (2019). *Cuautlancingo*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Auditoría Superior del Estado de Puebla: <https://www.auditoriapuebla.gob.mx/sujetos-de-revision/cuentas-publicas/ayuntamientos/item/cuautlancingo>
- Castañeda Antonio, D., Miguel Barrera, A., Santamaría Juárez, J., Munive Hernández, J., Rivera Tapia, A., & Ramos Cassellis, M. (2020). Modelo de

- biorremediación de plomo con lirio acuático. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 5(7), 15-28.
- Castebianco, J. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *Ciencias de la Vida*, 27(1), 21-35. doi:10.17163/lgr.n27.2018.02
- Chico Ruiz, J., Cerna Rebaza de Chico, L., Rodríguez Espejo, M., & Guerrero Padilla, M. (2012). Capacidad remediadora de la raíz de girasol, *Helianthus annuus*, cuando es sometida a diferentes concentraciones de plomo. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 32(2), 13-19.
- Collazos Silva, R. (2018). Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies *Eichhornia crassipes*, *Nhympoides humboldtiana* y *Nasturtium officinale*. *Revista de Investigación en Agroproducción Sustentable*, 2(3), 47-53.
- Contreras Ponce, A. (2010). *Acumulación de Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Pb, Cd, Ni en Eichhornia crassipes de cuerpos de aguas en el curso alto del río Lerma*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Ciencias del Agua, México. Recuperado el 07 de agosto de 2022
- CONAGUA. (2015). *Estadísticas del Agua en México: Edición 2015*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de CONAGUA: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EA_M2015.pdf
- CONAGUA. (2015). *Monitoreo de Calidad del Agua*. Guía informativa, Comisión Nacional del Agua, Sudirección General Técnica, México. Recuperado el 25 de marzo de 2022, de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/TF_CalidadAgua/CalidaddelAgua.pdf
- CONAGUA. (2015). *Numeragua México 2015*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de CONAGUA: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/NUMERAGUA2015.pdf>
- CONAGUA. (9 de Octubre de 2019). *Instrumentos de Gestión del Agua*. Obtenido de Gobierno de México : <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/instrumentos-de-gestion-del-agua>
- CONAGUA. (2020). *Sistema Nacional de Información del Agua SINA*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-del-agua-sina>
- Corcoran , E., Nellesmann, E. B., & Bos, D. O. (2010). *Sick Water? The central role of waste water management in sustainable development. A Rapid Response Assasment*. United Nations Enviroment Programme, UN-HABITAT. Noruega: GRID-Arendal. Obtenido de UN-HABITAT.
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación Ambiental por metales pesados en México: Problemática y Estrategias de Fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21.
- CPEO. (s.f.). *Phytoremediation*. Recuperado el 4 de Diciembre de 2020, de CPEO: <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/phytrem.htm#:~:text=Phytoremediati>

on%20is%20a%20bioremediation%20process,Rhizosphere%20biodegradat ion.

- Cuji Quingaluiza, J. (2017). *Evaluación del vetiver (Vetiveria zizanioides) para la disminución de Metales Pesados (Pb, Cd) en el canal de riego Latacunga - Salcedo - Ambato en el sector Samanga*. Obtenido de Repositorio Digital Universidad Técnica de Cotopaxi: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5985>
- Cunningham, S. D., & Ow, D. W. (1996). Promises and Prospects of Phytoremediation. *Plant Physiol*, 110, 715-719.
- DataMéxico. (2021). *Cuautlancingo*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Data México: <https://datamexico.org/es/profile/geo/cuautlancingo#Industrias>
- Dávila Cabanillas, N. (2007). LA APLICACIÓN DEL MODELO DPSIR AL AREA FUNCIONAL DE GERNIKA-MARKINA (Bizkaia). UN ENSAYO METODOLÓGICO DE ANALISIS TERRITORIAL. *XXXIII Reunión de Estudios Regionales: COMPETITIVIDAD, COHESIÓN Y DESARROLLO REGIONAL SOSTENIBLE* (pág. 25). León: Asociación Español de Ciencia Regional. Recuperado el 5 de mayo de 2022
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. A., Prieto García, F., Villagomez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2011), 597-612.
- Diario Oficial de la Federación. (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Obtenido de Justicia Mexico: <https://mexico.justia.com/federales/leyes/ley-general-del-equilibrio-ecologico-y-la-proteccion-al-ambiente/gdoc/>
- Diario Oficial de la Federación. (1989). *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89*. Obtenido de Compendio de Estadísticas Ambientales 2008: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServleta0c5.html
- Diario Oficial de la Federación. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2020, de SEMARNAT: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/60197.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (8 de abril de 2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. Recuperado el 25 de noviembre de 2021, de Diario Oficial de la Federación: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5339732&fecha=08/04/2014
- Díaz Zavaleta, G., Olvera Viascán, V., Romero Luna, F., & Aguirre Martínez, J. (1989). *Control y aprovechamiento del lirio acuático en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Investigación Subcoordinación de Calidad del Agua. Recuperado el 21 de Marzo de 2022, de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/814/IMTA_004.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Domos Agua. (2020). *Organismos Operadores del Agua en México*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2021, de Domos Agua: <https://www.domosagua.com/recursos/organismos-operadores-agua-mexico#:~:text=La%20Comisi%C3%B3n%20Nacional%20del%20Agua,la%20Ley%20de%20Aguas%20Nacionales.>
- Duque, S., Daniels, R., Crowder, K., & Jimenez, I. (2012). *Estrategia para el Desarrollo de Indicadores Frontera 2012: Programa Ambiental México - Estados Unidos*. Programa Ambiental, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182372/Estrategia_Desarrollo_Indicadores_esp.pdf
- El Zenontle. (2017). *Breve historia acerca de los problemas del agua y tierra en Coronango*. Recuperado el 10 de Febrero de 2021, de La Jornada de Oriente: <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/breve-historia-acerca-los-problemas-del-agua-la-tierra-coronango/>
- Elm, M. (7 de febrero de 2015). *Contaminación de aguas por metales pesados*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de La mama Pacha: <https://lamamapachama.wordpress.com/2015/02/07/contaminacion-de-aguas-por-metales-pesados/>
- Environmental Protection Agency. (2021). *Indicators: Dissolved Oxygen*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-dissolved-oxygen>
- Farraji, H., Zaman, N. Q., Tajuddin, R. M., & Faraji, H. (2016). Advantages and disadvantages of phytoremediation: A concise review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2, 69-75.
- Favas, P., Pratas, J., D'Souza, R., & Varun, M. (2014). Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora. En M. C. Hernández Soriano, *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (Vol. I). IntechOpen.
- García Gallegos, E., Hernández Acosta, E., García Nieto, E., & Acevedo Sandoval, O. A. (2011). Contenido y traslocación de plomo en avena (*Avena sativa*, L.) y haba (*Vicia faba*, L.) de un suelo contaminado. *Chapingo*, 17(1), 19-29.
- García, L., & Olivia, L. (2020). *Infografía: Tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de Revista Digital de Divulgación de la Ciencia:Tencología.: <http://ciencia.unam.mx/contenido/infografia/97/infografia-tratamiento-de-aguas-residuales>
- Gobierno de La Rioja. (2016). *Salud y Metales Pesados*. Recuperado el 28 de Enero de 2021, de Gobierno de La Rioja: <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/calidad-aire-cambio-climatico/calidad-aire/red-biomonitorizacion-metales-pesados-rioja/salud-metales-pesados#:~:text=Los%20metales%20pesados%20son%20componentes,altas%20pueden%20conducir%20al%20envenenamiento.>
- Greipsson, S. (2011). Phytoremediation. *Nature Knowledge Project*, 3(10), 7.
- Hanan Alipi, A. M., Mondragón Pichardo, J., & Vibrans, H. (2009). *Malezas de México, Ficha - Viguiera linearis (Cav.) Sch. Bip. Ex Hemsl*. Recuperado el

- 28 de Enero de 2021, de CONABIO:
<http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/viguiera-linearis/fichas/ficha.htm#1.%20Nombres>
- Gunsé Forcadell, B. D. (1987). *Efectos del Cromo sobre la nutrición y relaciones hídricas de Phaseolus vulgaris*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona, Facultad de Ciencias, Bellaterra. Recuperado el 03 de agosto de 2022
- Hanna Instruments. (3 de Septiembre de 2020). *¿Por qué el medir la alcalinidad del agua potable?* Obtenido de Hanna Instruments: <https://hannainst.com.mx/boletines/por-que-medir-la-alcalinidad-en-el-agua-potable/#:~:text=La%20alcalinidad%20o%20basicidad%20del,capacidad%20amortiguadora%20de%20una%20soluci%C3%B3n>.
- INEGI. (1994). *San Pedro Cholula: Cuaderno Estadístico Municipal Edición 1994*. Datos Estadísticos Municipales, México. Recuperado el 28 de Enero de 2021, de INEGI.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f.). *Cuatlaningo*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21041a.html>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f.). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Recuperado el 6 de abril de 2022, de San Pedro Cholula: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21140a.html>
- Juárez Luna, G. N. (2011). *Cambios en la composición del lirio acuático (Eichhornia crassipes) debido a su grado de madurez y a su transformación biotecnológica*. Tesis de licenciatura, Insituto Politécnico Nacional , Ciencias Biológicas, Distrito Federal.
- Kinuthia, G. K., Ngure, V., Beti, D., Lugalia, R., Wangila, A., & Kamau, L. (2020). Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: community health implication. *Nature*, 10(8434), 1-13. doi:10.1038/s41598-020-65359-5
- Know How to Go. (31 de enero de 2011). *Phytoextraction*. Recuperado el 25 de noviembre de 2021, de Know How to Go: <https://knowhowtogmo.wordpress.com/2011/01/31/phytoextraction/>
- Limmer, M., & Burken, J. (2016). Environmental Science & Technology: Phytovolatilization of Organic Contaminants. *ACS Publications*, 6632-6643. doi:10.1021/acs.est.5b04113
- Longley, K. (2007). *The feasibility of poplars for phytoremediation of TCE contaminated groundwater: A Cost-Effective and Natural Alternative Means of Groundwater Treatment*. Tesis de Maestría, The Evergreen State College, Olympia.
- López , C., Zambrano, L., Ruíz Ortega, R., Guzmán, M. A., Pérez Espejo, R., Sandoval, R., . . . Caldera, A. (2017). *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*. México: Fundación Friedich Ebert.

- López Guel, E. (2017). *Fitorremediación de plomo(Pb²⁺) en agua por medio de planta clonal, Hydricotyle bonariensis*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias del Mar y Limnología, Ciudad Universitaria.
- Maguey, H. (2017). *Más del 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria*. Recuperado el 20 de Enero de 2021, de Gaceta UNAM: <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/#:~:text=La%20industria%20de%20producci%C3%B3n%20y,por%20100%20millones%20de%20habitantes>.
- Márquez-Reyes, J. M., Vladés-González, A., García-Gómez, C., Rodríguez-Fuentes, H., Gamboa-Delgado, J., & Luna-Olvera, H. (2020). Evaluación de los efectos sinérgicos de cromo y plomo durante el proceso de fitorremediación con berro (*Nasturtium officinale*) en un humedal artificial. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 22(2), 171-178.
- Martínez Morales, O. (2011). *Biología y comportamiento de Neochetina eichhorniae (Warner) (Coleoptera: Curculionidae: erirhininae) en condiciones de laboratorio*. Recuperado el 21 de Marzo de 2022, de Libary: <https://1library.co/document/oz12o2dy-biologia-comportamiento-neochetina-coleoptera-curculionidae-erirhininae-condiciones-laboratorio.html>
- McCutcheon, S. C., & Jorgensen, S. E. (2008). Phytoremediation. En S. C. McCutcheon, & S. E. Jorgensen, *Encyclopedia of Ecology* (págs. 2751-2766). Academic Press.
- Medina Marcos, K. D., & Montano Chávez, Y. N. (2014). *Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el Juncus articus Willd. y Cortaderia rudiusscula Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Ancash 2013*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Facultad de Ciencias del Ambiente, Huaraz - Ancash.
- Mendieta Webster, C., & Taisigüe López, K. (2014). *Acumulación y traslocación de metales, metaloides y no metales en plantas nativas de la zona minera de Chontales: Implicaciones para el potencial de fito-remediación*. Artículo , Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Austrian Partnership Programme in Higher Education and Research for Development, Nicaragua.
- Miranda A., M. G., & Lot H., A. (1999). El lirio acuático ¿una planta nativa de México? *Ciencias* 53, 50-54.
- Miranda Muñoz, R. (2016). *Revisión Panorámica del Uso de Pasto Vetiver (Chrysopogon zizanioides) en restauración de Taludes como técnica de Bioingeniería del Suelo*. Tesis de Maestría, FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO, FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA, Bogotá. Recuperado el 17 de abril de 2022, de <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/1757/T072.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moosavi, S. G., & Seghatoleslami, M. J. (2013). Phytoremediation: A review. *Advance in Agriculture and Biology*, 1(1), 5-11.
- Naciones Unidas. (s.f.). *Desafíos Globales: Agua*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2021, de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/global-issues/water>

- Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguín, E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Biotecnología y Biología*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2020
- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria-Villa, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- PADHOT. (2010). *Puebla*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2020, de Coordinación Técnica de la Red de Agua UNAM: <http://www.agua.unam.mx/padhpot/puebla.html>
- Parra Gallegos, F. (2019). *Rizofiltración de aguas de riego agrícola contaminados por metales pesados en comunidades del municipio de Atlixco, Puebla*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Posgrado de Ciencias Ambientales, Puebla.
- Peña Cabriales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(Especial Biotecnología e Ingeniería Ambiental), 7-21.
- Peuke, D. A., & Rennenberg, H. (2005). Phytoremediation. *EMBO Reports*, 6(6), 497-501. doi:10.1039/sj.embor.7400445
- Porras Pardo, C. (2017). *Estudio de Buchon de Agua (Eichhornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2020, de Repositorio de la Universidad Abierta y a Distancia: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/17528/1098682038.pdf;jsessionid=D177F6F279A668F4233EC6E7665A0BD3.jvm1?sequence=1>
- Pulido Id, S. P., Miranda, V. A., Guzmán Guavita, M., & Molano, E. J. (s.f.). *PTAR-Uniminuto :Origen y Características de las aguas residuales*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2020, de Sites Google: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>
- Ramirez Morales, O. L., & Valdez Vargas, K. (2018). *Centro Educativo Integral para niños en situación de calle*. Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Arquitectura, Puebla.
- Ramírez, J. D. (2018). Evaluación del vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la caracterización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS*, 4(1), 1-13.
- Reyes Vásquez, M. P. (2020). *Factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en Eichhornia crassipes de la Laguna Olmeca en Veracruz*. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Boca del Río, Posgrado en Ciencias Ambientales, Boca del Río.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rivera Páez, I. (2018). *Evaluación del potencial de fitorremediación del vetiver (Chrysopogon zizanioides) sobre aluminio, cromo y cobre en la laguna de*

- oxidación del municipio de Jerusalén (Cundinamarca)*. Tesis de Licenciatura , Universidad El Bosque, Bogotá.
- Rodríguez-Lara, J. W., Cervantes-Ortiz, F., Arámbula-Villa, G., Mariscal-Amaro, L. A., Aguirre-Mancilla, C. L., & Andrio-Enríquez, E. (2022). Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*): una revisión. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 1-12. doi:10.15517/am.v33i1.44201
- Rodríguez-Lara, J. W., Cervantes-Ortiz, F., Arámbula-Villa, G., Mariscal-Amaro, L. A., Aguirre-Mancilla, C. L., & Andrio-Enríquez, E. (2022). Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*): una revisión. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 1-12. doi:10.15517/am.v33i1.44201
- Rodríguez-Miranda, J. P., Garzón, J. M., & Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de la contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 19(2), 309-318. doi:10.22267/rus.171902.93
- Rojas-Sandoval, J. (2020). *Chrysopogon zinaoides (vetiver)*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Centre for Agricultural Bioscience International: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/18528934>
- Romero Ledezma, K. (2009). Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1).
- Roongtanakiat, N. (2010). *VETIVER PARA LA FITORREMEDIACIÓN EN TAILANDIA*. Artículo, Universidad Kasetsart, Radiación Aplicada e isótopos, Bangkok. Recuperado el 07 de agosto de 2022, de https://www.vetiver.org/LAC1_2010_CONFERENCE/4PpSp%20Phytoremediation%20Thailand.pdf
- Salazar Estrella, L. A. (2015). *Efecto de la frecuencia ultrasónica de la actividad fotosintética en plantas de lirio acuático*. Grado de licenciatura, Distrito Federal. Recuperado el 25 de marzo de 2022, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/22037/EFEECTO%20DE%20LA%20FRECUENCIA%20ULTRAS%20C%20EN%20LA%20ACTIVIDAD%20FOTOSINT%20EN%20PLANTAS%20DE%20LIRIO%20ACU%20TICO..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saleh, H. M., & Koller, M. (2018). Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals. En H. M. Saleh, & M. Koller, *Heavy Metals* (págs. 3-11). doi:10.5772/intechopen.74783
- Sasi, K. (2011). *Phytoremediation - Applications, Advantages and Limitations*. Recuperado el 4 de Diciembre de 2020, de Biotech Articles: <https://www.biotecharticles.com/Applications-Article/Phytoremediation-Applications-Advantages-and-Limitations-785.html>
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2000). *Análisis de Agua - Determinación de la Conductividad Electrolítica - Método de Prueba*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2020, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166800/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>
- Secretaría de Economía. (2001). *NMX-AA-028-SCFI-2001: Análisis de Agua - Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Nacionales, Residuales (DBO5) y Residuales Tratadas - Método de Prueba*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2020, de Secretaría de Economía del Gobierno de

- México: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- Secretaría de Gobernación. (2016). *Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2020, de Diario Oficial de la Federación: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5452147&fecha=09/09/2016
- Segretin, M. E., Bey, P., & Mentaberry, A. (2010). Fitorremediación. En M. E. Segretin, P. Bey, A. Mentaberry, G. L. Levintus, V. Echenique, C. Rubinstein, . . . L. A. Mroginski, *Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II* (pág. 643). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- SEMARNAT. (2011). *Tratado sobre aguas internacionales entre México y Estados Unidos: Definición y clasificación de sequía*. Reporte, CONAGUA, México.
- SEMARNAT. (2013). *Agua - Calidad. Aguas Residuales*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de SEMARNAT: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html.
- SEMARNAT. (s.f.). *Marcos Conceptuales de Indicadores Ambientales*. Recuperado el 21 de Mayo de 2022, de SEMARNAT: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores14/conjuntob/00_conjunto/marco_conceptual2.html
- Society of Risk Analysis Latin America. (2019). *Contaminación del Agua en México*. Recuperado el 20 de Enero de 2021, de Society of Risk Analysis Latin America: <https://srala.org/contaminacion-del-agua-en-mexico/#:~:text=El%20vertido%20de%20desechos%20municipales,deforestaci%C3%B3n%20y%20erosi%C3%B3n%20del%20suelo>.
- Soto F., J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11(2), 167-177.
- Tribunal Latinoamericano del Agua. (2006). *México 2006*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2021, de Tribunal Latinoamericano del Agua: <http://tragua.com/audiencias/primera-audiencia-regional-latinoamericana-ano-2006-districto-federal-mexico/>
- Vidal Durango, J. V., Marrugo Negrete, J. L., Jaramillo Colorado, B., & Pérez Castro, L. M. (2010). Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería y Desarrollo*, 27. Recuperado el 17 de Febrero de 2021
- We are Water Foundation. (2017). *Aguas negra, el rastro de nuestra historia*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de We are Water Foundation: https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia_281141
- Weather Spark. (2021). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en San Juan B. Cuautlancingo*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/6680/Clima-promedio-en-San-Juan-B.-Cuautlancingo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-PrecipitationProbability>

Weather Spark. (s.f.). *El clima y el tiempo promedio de todo el año de San Pedro Cholula*. Recuperado el 8 de abril de 2022, de Weather Spark: <https://es.weatherspark.com/y/5802/Clima-promedio-en-San-Pedro-Cholula-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Precipitation>

WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en 2017. Aguas Residuales: El recurso desaprovechado*. UNESCO, París.

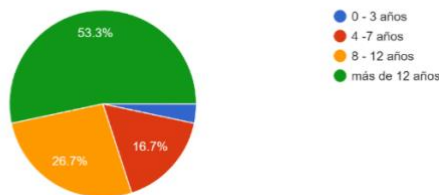
Yaday, M., Gupta, R., & Kumar Sharma, R. (2019). Chapter 14: Green and Sustainable Pathways for Wastewater Purification. 14.2.6. Heavy Metals. En M. Yaday, R. Gupta, & R. Kumar Sharma, *Advances in Water Purification Techniques* (págs. 355-383). ELSEIVER. doi:10.1016/B978-0-12-814790-0.00014-4

Zeeb Labs. (s.f.). *Phytoremediation*. Recuperado el 25 de noviembre de 2021, de Zeeb Phytoremediation Lab: <https://zeeblab.wordpress.com/>

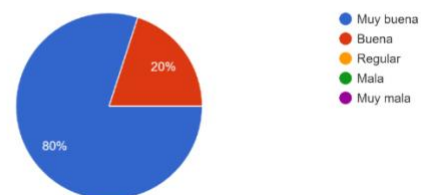
ANEXOS

ANEXO A. Encuestas y Entrevistas.

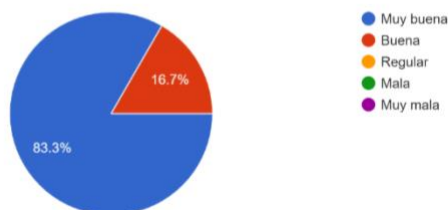
¿Cuántos años lleva viviendo en la comunidad de Sta. Bárbara Almoloya?
30 respuestas



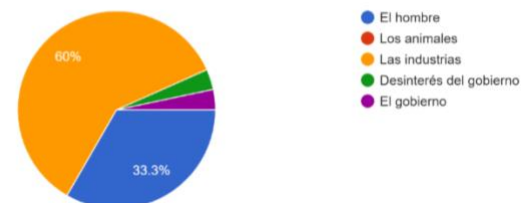
¿Cómo era la situación del Río Prieto hace 30 años?
30 respuestas



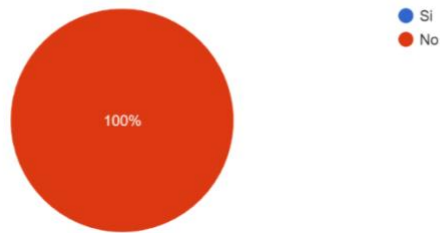
¿Cómo era la situación del manantial de la iglesia tiempo atrás?
30 respuestas



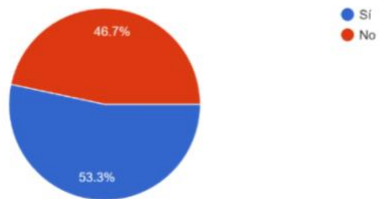
¿Cuál cree que es el principal agente contaminante del río hoy en día?
30 respuestas



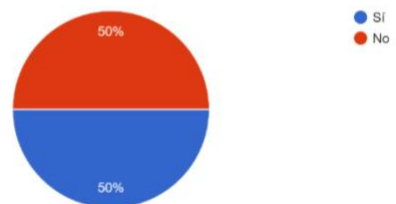
¿Ha experimentado alguna consecuencia relacionada con el agua que proviene del río Prieto?
30 respuestas



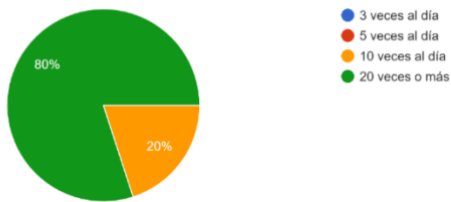
¿Esta de acuerdo con que el agua que llega a los hogares es completamente potable?
30 respuestas



¿Cree que el río Prieto se pueda restaurar en un futuro?
30 respuestas



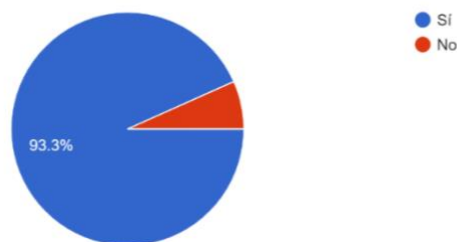
¿Cuántas veces al día hace uso del agua?
30 respuestas



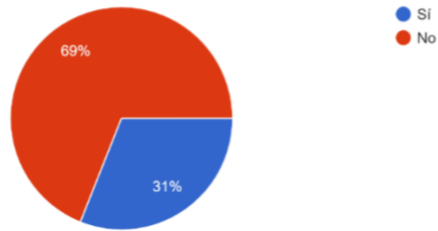
¿Cómo debería de ser la preocupación por la falta de agua en el futuro?
30 respuestas



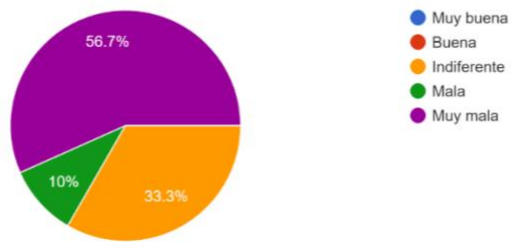
¿Tiene noción de la problemática que vive el estado y el país con respecto a la situación del agua?
30 respuestas



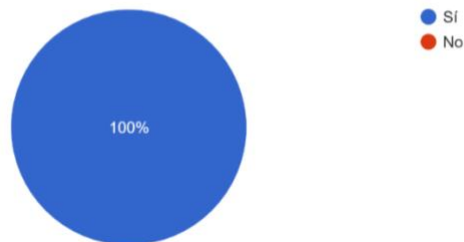
¿Conoce alguna iniciativa que se lleve a cabo en favor del agua?
29 respuestas



¿Cuál piensa que es la postura del gobierno en temas de cuidado del medio ambiente?
30 respuestas



¿Estaría dispuesto a apoyar proyectos de conservación del agua en su comunidad?
30 respuestas



ANEXO B. Concentraciones de metales pesados por período de experimentación.

- Análisis de agua a los 2 meses.

Tabla 1. Concentraciones en mg/L de metales pesados en las tinas experimentales con agua de los cuerpos de agua 2 meses después de aplicado el tratamiento de Lirio Acuático y Vetiver en cada una de ellas.

Punto Muestreo	Tratamiento	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Lirio Ac.	0	0	0	0	7.18	17.5
	Vetiver	0	0	0	0	7.37	20.1
MR2	Lirio Ac.	0	0	0	0	7.83	17.4
	Vetiver	0	0	0	0	7.83	22.2
MR3	Lirio Ac.	0	0	0	0	6.69	20
	Vetiver	0	0	0	0	7.73	17.7
Testigo Río	Lirio Ac.	0	0	0	0	0.741	17.6
	Vetiver*	-	-	-	-	-	-
Pozo	Lirio Ac.	0	0	0	0	6.92	18.6
	Vetiver	0	0	0	0	6.79	20.4
Manantial	Lirio Ac.	0	0	0	0	8.01	21
	Vetiver	0	0	0	0	7.95	17.8
Testigo Iglesia	Lirio Ac.	0	0	0	0	7.6	20.4
	Vetiver	0	0	0	0	7.28	18.2

*Muestra perdida durante la digestión ácida.

- Análisis de partes vegetales a los 2 meses.

Tabla 2. Concentración de metales pesados (mg/Kg Base seca) absorbida por medio del tejido vegetal de Lirio Acuático después de dos meses de iniciado el experimento.

Puntos Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	0	0	0	6.67	178.17	380
MR1	Raíz	41.67	0	0	18.33	189.83	380
MR2	Tallo	0	0	0	6.67	174.67	386.67
MR2	Raíz	193.33	0	0	46.67	213	481.67
MR3	Tallo	0	0	0	11.67	176.5	365
MR3	Raíz	43.33	0	0	26.67	229.83	441.67
TR	Tallo	0	0	0	8.33	192.33	353.33
TR	Raíz	20	0	0	23.33	189.83	478.33
Pozo	Tallo	0	0	0	1.67	150.5	441.67
Pozo	Raíz	10	0	0	13.33	166	375
Manantial	Tallo	0	0	0	5	147.83	395
Manantial	Raíz	11.67	0	0	18.33	171.67	405
TI	Tallo	0	0	0	6.67	149.83	366.67
TI	Raíz	0	0	0	5	184.33	390

Tabla 3. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de *Vetiver* después de dos meses de iniciado el experimento.

Punto Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	15	0	0	11.67	162.67	418.33
MR1	Raíz	48.33	0	0	60	204.83	421.67
MR2	Tallo	3.33	0	0	8.33	166.83	323.33
MR2	Raíz	71.67	0	0	61.67	190	486.67
MR3	Tallo	26.67	0	0	30	183	473.33
MR3 *	Raíz	-	-	-	-	-	-
TR	Tallo	31.67	0	0	46.67	176.33	371.67
TR	Raíz	0	0	0	21.67	192.17	408.33
Pozo	Tallo	0	0	0	11.67	171.17	343.33
Pozo	Raíz	33.33	0	0	66.67	213.33	418.33
Manantial	Tallo	0	0	0	11.67	168.5	345
Manantial	Raíz	3.33	0	0	28.33	207	371.67
TI *	Tallo	-	-	-	-	-	-
TI	Raíz	36.67	0	0	11.67	231.83	426.67

* Muestras pérdidas en el proceso de digestión ácida.

- Análisis de agua a los 4 meses.

Tabla 4. Concentraciones en mg/L de metales pesados en las tinas experimentales con agua de los cuerpos de agua 4 meses después de aplicado el tratamiento de *Lirio Acuático* y *Vetiver* en cada una de ellas.

Punto Muestreo	Tratamiento	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Lirio Ac.	0	0	0	0	4.76	11.1
	Vetiver	0	0	0	0	5.06	11.1
MR2	Lirio Ac.	0	0	0	0	5.27	8.2
	Vetiver	0	0	0	0	6.35	12.3
MR3	Lirio Ac.	0	0	0	0	5.82	5.6
	Vetiver	0	0	0	0	6.19	5.5
Testigo Río	Lirio Ac.	0	0	10.3	0.1	6.66	6.3
	Vetiver	0	0	9.9	0	6.61	6.9
Manantial	Lirio Ac.	0	0	9.8	0	6.24	7.1
	Vetiver	0	0	9.7	0	7.44	4.2
Pozo	Lirio Ac.	0	0	9.7	0	6.42	7.6
	Vetiver	0	0	9.4	0.5	6.85	2.9
Testigo Iglesia	Lirio Ac.	0.1	0	10.1	0.3	7.01	5
	Vetiver	0	0	9.3	0	6.55	5.7

- Análisis de partes vegetales a los 4 meses.

Tabla 5. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Lirio Acuático después de cuatro meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	8.33	0	140	21.67	179	423.33
MR1	Raíz	86.67	0	145	43.33	196	411.67
MR2	Tallo	5	0	130	15	177.33	410
MR2	Raíz	213.33	0	136.67	53.33	233.17	498.33
MR3	Tallo	1.67	0	130	20	189	448.33
MR3	Raíz	75	0	138.33	55	253.67	456.67
Testigo Río	Tallo	6.67	0	130	33.33	214.17	413.33
Testigo Río	Raíz	43.33	0	140	46.67	194.67	530
Manantial	Tallo	0	0	135	5	155.17	498.33
Manantial	Raíz	16.67	0	133.33	20	186.5	378.33
Pozo	Tallo	0	0	136.67	16.67	219.17	438.33
Pozo	Raíz	30	0	143.33	30	245.5	471.67
Testigo Iglesia	Tallo	0	0	165	10	218.67	380
Testigo Iglesia	Raíz	18.33	0	165	16.67	236.33	390

Tabla 6. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Vetiver después de cuatro meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	18.33	0	126.67	20	167.17	505
MR1	Raíz	95	0	128.33	88.33	216.5	455
MR2	Tallo	6.67	0	126.67	13.33	168.17	356.67
MR2	Raíz	116.67	0	130	80	195.67	491.67
MR3	Tallo	35	0	125	38.33	199.33	476.67
MR3	Raíz	36.67	0	128.33	33.33	184.33	178.33
Testigo Río	Tallo	43.33	0	135	63.33	210.17	436.67
Testigo Río	Raíz	6.67	0	131.67	31.67	178.83	436.67
Manantial	Tallo	6.67	0	140	25	236.17	373.33
Manantial	Raíz	33.33	0	140	248.33	293.33	433.33
Pozo	Tallo	0	0	140	15	241.83	425
Pozo	Raíz	6.67	0	140	41.67	262.33	373.33
Testigo Iglesia	Tallo	0	0	161.67	5	41.67	0

Testigo							
Iglesia	Raíz	38.33	0	156.67	21.67	251.33	426.67

- Análisis de agua a los 6 meses.

Tabla 7. Concentraciones en mg/L de metales pesados en las tinas experimentales con agua de los cuerpos de agua 6 meses después de aplicado el tratamiento de Lirio Acuático y Vetiver en cada una de ellas.

Punto Muestreo	Tratamiento aplicado	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
M.R.1	Lirio Ac.	0	0.8	4.1	0.1	0.42	1.9
	Vetiver	0.1	0.8	4.1	0.2	0.53	1.1
M.R. 2	Lirio Ac.	0	0.8	3.8	0.3	0.56	1.7
	Vetiver	0.1	0.9	3.9	0.3	0.45	1
M.R. 3	Lirio Ac.	0	0.9	3.7	0.2	0.91	1.1
	Vetiver	0.1	0.9	3.7	0.2	0.82	1
T. R.	Lirio Ac.	0.1	0.9	3.5	0.3	0.73	1.1
	Vetiver	0.1	0.9	3.7	0.3	0.72	1
Manantial	Lirio Ac.	0	0.9	3.8	0.1	0.73	1
	Vetiver	0	0.8	4	0	0.74	1.1
Pozo I.	Lirio Ac.	0.1	0.8	3.9	0.2	0.6	1.2
	Vetiver	0.1	0.7	3.9	0.2	0.52	1
T.I.	Lirio Ac.	0.1	0.7	3.4	0.1	0.34	1
	Vetiver	0.1	0.7	3.2	0	0.46	0.8

- Análisis de partes vegetales a los 6 meses.

Tabla 8. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Lirio Acuático después de seis meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	16.67	0	140	40	218.67	423.33
MR1	Raíz	108.33	0	145	63.33	243.83	420
MR2	Tallo	5	0	130	23.33	200.33	410
MR2	Raíz	230	0	136.67	75	293.17	506.67
MR3	Tallo	1.67	0	130	36.67	240	448.33
MR3	Raíz	80	0	176.67	76.67	307	456.67
Testigo Río	Tallo	6.67	0	130	38.33	240	413.33
Testigo Río	Raíz	51.67	0	140	58.33	215.33	530
Manantial	Tallo	0	0	135	5	157.83	498.33
Manantial	Raíz	16.67	0	133.33	21.67	188.67	378.33
Pozo	Tallo	0	0	136.67	16.67	220.17	438.33
Pozo	Raíz	38.33	0	161.67	36.67	267.5	471.67
Testigo Iglesia	Tallo	0	0	165	10	227.83	380

Testigo Iglesia	Raíz	45	0	165	21.67	249.83	390
-----------------	------	----	---	-----	-------	--------	-----

Tabla 9. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Vetiver después de seis meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	20	0	126.67	26.67	186.33	526.67
MR1	Raíz	100	0	128.33	100	247.67	455
MR2	Tallo	6.67	0	126.67	15	188.17	356.67
MR2	Raíz	123.33	0	130	90	232.5	500
MR3	Tallo	35	0	125	40	221.17	476.67
MR3	Raíz	38.33	0	128.33	46.67	217.67	350
Testigo Río	Tallo	43.33	0	135	71.67	229	436.67
Testigo Río	Raíz	33.33	0	155	73.33	220.5	463.33
Manantial	Tallo	6.67	0	140	25	236.5	373.33
Manantial	Raíz	38.33	0	140	258.33	302	436.67
Pozo	Tallo	0	0	140	15	242.17	425
Pozo	Raíz	45	0	140	76.67	291	423.33
Testigo Iglesia	Tallo	0	0	161.67	5	50.17	0
Testigo Iglesia	Raíz	56.67	16.67	178.33	43.33	288.83	435

- Análisis de agua a los 8 meses.

Tabla 10. Concentraciones en mg/L de metales pesados en las tinas experimentales con agua de los cuerpos de agua 8 meses después de aplicado el tratamiento de Lirio Acuático y Vetiver en cada una de ellas.

Punto de Muestreo	Tratamiento aplicado	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
M.R.1	Lirio Ac.	0	0	1.6	0.08	0.12	0.14
	Vetiver	0	0	1.03	0.05	0.22	0.15
M.R. 2	Lirio Ac.	0	0	2.02	0.24	0.05	0.17
	Vetiver	0	0	1.33	0.12	0.08	0
M.R. 3	Lirio Ac.	0	0	1.51	0.14	0.25	0
	Vetiver	0	0	1.98	0.2	0.1	0.03
T. R.	Lirio Ac.	0	0	1.74	0.16	0.14	0
	Vetiver	0	0	1.16	0.17	0	0
Manantial	Lirio Ac.	0	0	0	0	0	0
	Vetiver	0	0	0	0	0.23	0.09
Pozo I.	Lirio Ac.	0	0	0	0.15	0.07	0
	Vetiver	0	0	0	0.14	0	0.08
T.I.	Lirio Ac.	0	0	0	0.07	0	0
	Vetiver	0	0	0.02	0	0	0

- Análisis de partes vegetales a los 8 meses.

Tabla 11. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Lirio Acuático después de ocho meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	16.67	8.5	157.67	53.33	232	441.33
MR1	Raíz	119	10.17	190.5	81.5	272.5	446.33
MR2	Tallo	5	8.83	136.33	38.17	228.5	417.17
MR2	Raíz	236.33	11.5	145.83	101	357.33	567.83
MR3	Tallo	1.67	10.83	131.83	38.17	254.5	476.33
MR3	Raíz	109.83	11.67	181.5	104	357.67	493.67
Testigo Río	Tallo	6.67	12.33	147.17	38.33	242	439.5
Testigo Río	Raíz	51.67	14.17	165	69.33	219.83	567.83
Manantial	Tallo	0	14.17	159.5	5	324.5	531.67
Manantial	Raíz	16.67	15	159.33	29	189	404.5
Pozo	Tallo	0	15.67	181.5	16.83	220.17	466.83
Pozo	Raíz	38.33	16.67	206.67	54	272.33	505
Testigo Iglesia	Tallo	0	16.67	199.83	14.83	234.83	419.83
Testigo Iglesia	Raíz	45	18.33	213.17	43.33	259	435.17

Tabla 12. Concentración de metales pesados (mg/Kg *Base seca*) absorbida por medio del tejido vegetal de Vetiver después de ocho meses de iniciado el experimento.

Punto de Muestreo	Tejido Vegetal	Cromo	Cadmio	Plomo	Cobre	Zinc	Níquel
MR1	Tallo	21.5	15.83	152	30.17	189.67	526.67
MR1	Raíz	106.83	17.33	171.67	113.17	259.17	457.83
MR2	Tallo	18.5	18.83	156	22.67	190.67	377.5
MR2	Raíz	147.67	20.17	199.83	118.67	251.5	544.67
MR3	Tallo	37.5	18	177.83	53.33	230.67	491.83
MR3	Raíz	48.67	18.67	185.83	77	231.17	381.83
Testigo Río	Tallo	63	21	146.33	84.5	234.33	441
Testigo Río	Raíz	58.83	21.17	201.67	136.17	267.67	517.83
Manantial	Tallo	10	20.17	181.17	46.33	240.83	377.17
Manantial	Raíz	56.17	22.5	218.67	274.33	306.5	462.83
Pozo	Tallo	5.83	21.83	194.83	16.5	244.67	428.83
Pozo	Raíz	62.67	23.5	233	95.33	329.17	446.67
Testigo Iglesia	Tallo	17.67	21.17	194	5.67	55.33	1.33

Testigo	Raíz						
Iglesia		77.67	39.83	220.83	63.67	317	451.33

ANEXO C. Tasas de Remoción por período de tratamiento.

- TRATAMIENTO LIRIO ACUÁTICO

PUNTO MUESTREO RÍO #1												
Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.9	0	100	0	0	-	0.4	0	100	1.78	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.8	-	2.45	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	10.7	4.1	61.68	5.89	1.6	72.84
Cobre (Cu)	0.6	0	100	0	0	-	1.8	0.1	94.44	5.31	0.08	98.49
Zinc (Zn)	7.61	7.18	5.65	7.18	4.76	33.70	5.64	0.42	92.55	0.93	0.12	87.10
Níquel (Ni)	17.2	17.5	-1.74	17.5	11.1	36.57	1.32	1.9	-43.94	2.37	0.14	94.09

PUNTO MUESTREO RÍO #2												
Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.3	0	100	0	0	-	0.2	0	100	1.67	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.8	-	2.46	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	11.5	3.8	66.96	6.67	2.02	69.72
Cobre (Cu)	0.3	0	100	0	0	-	1.9	0.3	84.21	1.56	0.24	84.62
Zinc (Zn)	6.44	7.83	-21.58	7.83	5.27	32.69	6.04	0.56	90.73	1.36	0.05	96.32
Níquel (Ni)	16.3	17.4	-6.75	17.4	8.2	52.87	10.7	1.7	84.11	3.08	0.17	94.48

PUNTO MUESTREO RÍO #3

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.2	0	100	0	0	-	0.2	0.1	50	1.89	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.9	-	3.66	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	11.5	3.7	67.83	6.78	1.51	78
Cobre (Cu)	176.7	0	100	0	0	-	1.8	0.2	88.89	0.57	0.14	75
Zinc (Zn)	6.84	6.69	2.19	6.69	5.82	13	6.87	0.91	86.75	1.27	0.25	80
Níquel (Ni)	18.3	20	-9.29	20	5.6	72	8.2	1.1	86.59	2.74	0	100

PUNTO MUESTREO MANANTIAL

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-	0.1	0	100	0.2	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.9	-	0.9	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	9.8	-	12.4	3.8	69.35	5.2	0	100
Cobre (Cu)	0	0	-	0	0	-	1.4	0.1	-	0.18	0	100
Zinc (Zn)	7.35	8.01	-8.98	8.01	6.24	22.10	6.76	0.73	89.20	2.47	0	100
Níquel (Ni)	21.3	21	1.41	21	7.1	66.19	9.2	1	89.13	5.8	0	100

PUNTO MUESTREO POZO

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-	0.1	0.1	0	0.3	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.8	-	0.8	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	9.7	-	13.9	3.9	71.94	4.7	0	100
Cobre (Cu)	0	0	-	0	0	-	1.2	0.2	83.33	0.23	0.15	34.78
Zinc (Zn)	7.35	6.92	5.85	6.92	6.42	7.23	6.87	0.6	91.27	2.2	0.07	96.82
Níquel (Ni)	21.3	18.6	12.68	18.6	7.6	59.14	9.5	1.2	87.37	4.5	0	100

- TRATAMIENTO VETIVER

PUNTO MUESTREO RÍO #1

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.9	0	100	0	0	-	0.4	0.1	75	1.88	0	-
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.8	-	2.39	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	4.2	4.1	2.38	7.12	1.03	85.53
Cobre (Cu)	0.6	0	100	0	0	-	1.8	0.2	88.89	5.41	0.05	99.08
Zinc (Zn)	7.61	7.37	3.15	7.37	5.06	31.34	5.94	0.53	91.08	1.04	0.22	78.85
Níquel (Ni)	17.2	20.1	-16.86	20.1	11.1	44.78	13.2	1.1	91.67	1.57	0.15	90.45

PUNTO MUESTREO RÍO #2

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.3	0	100	0	0	-	0.2	0.1	50	1.75	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.9	-	2.56	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	11.5	3.9	66.09	6.77	1.33	80.35
Cobre (Cu)	0.3	0	100	0	0	-	1.9	0.3	84.21	1.56	0.12	92.31
Zinc (Zn)	6.44	7.83	-21.58	7.83	6.35	18.90	7.12	0.45	93.68	1.25	0.08	93.6
Níquel (Ni)	16.3	22.2	-36.20	22.2	12.3	44.59	14.8	1	93.24	2.38	0	100

PUNTO MUESTREO RÍO #3

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0.2	0	100	0	0	-	0.2	0.1	50	1.89	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.9	-	2.49	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	0	-	11.5	3.7	67.83	6.78	1.98	70.80
Cobre (Cu)	176.7	0	100	0	0	-	1.9	0.2	89.47	0.57	0.2	64.91
Zinc (Zn)	6.84	7.73	-13.01	6.84	6.19	9.50	7.24	0.82	88.67	1.18	0.1	91.53
Níquel (Ni)	18.3	17.7	3.28	18.3	5.5	69.95	8.1	1	87.65	2.64	0.03	98.86

PUNTO MUESTREO MANANTIAL

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-	0.1	0	100	0.2	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.8	-	0.8	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	9.7	-	12.3	4	67.48	5.4	0	100
Cobre (Cu)	0	0	-	0	0	-	1.4	0	100	0.08	0	100
Zinc (Zn)	7.35	7.95	-8.163265	7.95	7.44	6.42	7.96	0.74	90.70	2.48	0.23	90.73
Níquel (Ni)	21.3	17.8	16.431925	17.8	4.2	76.40	6.3	1.1	82.54	5.9	0.09	98.47

PUNTO MUESTREO POZO

Parámetro	Período (días)			Período (días)			Período (días)			Período (días)		
	0	60	% Remoción	60	120	% Remoción	120	180	% Remoción	180	240	% Remoción
Cromo (Cr)	0	0	-	0	0	-	0.1	0.1	0	0.3	0	100
Cadmio (Cd)	0	0	-	0	0	-	0	0.7	-	0.7	0	100
Plomo (Pb)	0	0	-	0	9.4	-	13.6	3.9	71.32	4.7	0	100
Cobre (Cu)	0	0	-	0	0.5	-	1.7	0.2	88.24	0.23	0.14	39.13
Zinc (Zn)	7.35	6.79	7.62	6.79	6.85	-0.88	7.3	0.52	92.88	2.12	0	100
Níquel (Ni)	21.3	20.8	2.35	20.8	2.9	86.06	4.8	1	79.17	4.3	0.08	98.14