

INTRODUCCION

Antecedentes

Se considera metal pesado a aquel elemento químico que tiene una densidad igual o superior a 5 g/cm³ cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). (Dorrnsoro & Garcia, 2000).

Hoy en día uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, ya que es debido a su toxicidad que presentan, que son considerados como un serio problema para los habitantes de las poblaciones que se abastecen de dichos cuerpos de agua. (Vilchez, 2005).

Dentro de los principales factores que afectan los ecosistemas por contaminación por metales pesados, se encuentran las ocasionadas por el hombre, ya sea por la presencia de compuestos o elementos que no estarían sin la acción de este, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido a la acción humana. (Vilchez, 2005).

Así mismo existe contaminación de origen litológico o geoquímico a partir de los minerales que por causas de erosión, lluvias, etc. son arrastradas al agua. Sin embargo, actualmente el mayor aporte de contaminación es de origen antropogénico donde destacan como mayoritarias las operaciones de tipo minero y de fundición entre otras actividades de tipo industrial y urbana. (Vilchez, 2005).

Este hecho conlleva un gran número de problemas tanto en la vida de las plantas, animales, como en la vida humana, esto debido a que los metales pesados tienen una alta persistencia en el ambiente debido a que no pueden degradarse, ni biológica ni químicamente en la naturaleza, esto quiere decir que estos pueden permanecer por largos periodos de tiempo (Calva & Torres, 2003). Entre los metales que más se destaca su presencia y su alta toxicidad son el Plomo, Mercurio, Cadmio y Arsénico. (Ferrer, 2003).

Uno de los mayores riesgos de la presencia de metales pesados en el ecosistema es la capacidad que tienen algunas plantas como también los animales y el hombre de

acumular metales pesados en sus tejidos, ocasionando una contaminación en la cadena alimenticia esto debido a que al ser consumidos pueden transferir los metales pesados a otros organismos, aunque la acumulación de estos sea en trazas en los organismos vivos estos traen efectos tóxicos a lo largo del tiempo. (Mendez, Gonzales, & Roman, 2009).

En el hombre los efectos pueden ser erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, cáncer de pulmón, afecciones cardíacas, óseas, etc. (Calva & Torres, 2003).

En el mundo existen varios casos de contaminación por metales pesados en aguas superficiales.

En Estados Unidos se tiene la contaminación de varios cuerpos de aguas como lo son la Bahía de Chesapeake debido a vertidos industriales y urbanos que han contribuido a la acumulación de metales como Cobre y Zinc, el Rio Animas en Colorado que en agosto del 2015 se produjo un derrame accidental de aguas ácidas y lodos contaminados con metales pesados de una mina abandonada el cual liberó grandes cantidades de Plomo, arsénico y otros metales pesados. (AP, 2019). La Bahía de San Francisco que ha experimentado problemas de contaminación por metales pesados, como mercurio y Plomo, derivados de vertidos industriales y actividades urbanas, el Río Columbia en Washington y Oregón debido a la actividad minera, industrial y agrícola en la cuenca esto ha contribuido a la contaminación por metales pesados, incluyendo Cadmio y Zinc, el Río Clark Fork y el Lago Coeur d'Alene que han sido afectados por la minería en el estado de Montana dejando contaminación por metales pesados, incluyendo Plomo, Cadmio y Zinc, en ríos y arroyos, el Río Mississippi debido a la escorrentía agrícola y la actividad industrial en la cuenca, el Río Ohio cuya contaminación ha sido atribuida a diversas fuentes, como ser las descargas de aguas residuales industriales y agrícolas, en donde se reportó la presencia de metales pesados como en Plomo y Cromo. (American-Rivers, 2022).

En lugares como Europa se tiene la contaminación de cuerpos de aguas como ser en el Río Danubio que ha experimentado problemas de contaminación por metales pesados, especialmente después de eventos como el derrame de cianuro en la cuenca del río Tisza en 2000, el Río Elba debido a la actividad industrial y la liberación de sustancias químicas, el Río Po en Italia que ha sido afectado por la contaminación industrial, incluyendo la liberación de metales pesados, el Río Tinto en España que es conocido por su alto contenido de metales pesados, incluyendo Hierro, Cobre y Zinc, debido a la actividad minera en la región, el Río Odra en Polonia como resultado de actividades industriales y vertidos no regulados. (ABC-Sociedad, 2019).

En Asia los casos más relevantes son del Río Citarum en Indonesia que ha sido considerado uno de los ríos más contaminados del mundo. La contaminación incluye metales pesados derivados de descargas industriales y residuos domésticos no tratados, el Río Yamuna en India que en sus aguas se detectaron metales pesados como el Cadmio y el Plomo cuya contaminación proviene de descargas industriales y aguas residuales urbanas, el Río Pasig en Filipinas debido a la actividad industrial y la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales, el Río Huai en China donde se ha detectado metales pesados como el arsénico y el Plomo como consecuencia de la actividad industrial y agrícola en la región, el Río Amur, que forma parte de la frontera entre Rusia y China, que en sus aguas tiene presente metales pesados como lo son el Arsénico y Mercurio, derivados de actividades industriales y mineras. (Asianews, 2017).

En Latinoamérica se tiene casos de contaminación por metales pesados en ríos como lo son el Río Riachuelo en Argentina debido a contaminantes industriales, el Río Mantaro en Perú debido a la actividad minera en la región, el Río Bogotá en Colombia por problemas de contaminación industrial y urbana con la presencia de metales pesados como el Plomo y el Cadmio en sus aguas. (Perez, Lizana, & Oré, 2022). El Río Doce en Brasil el cual experimentó un desastre ambiental en 2015 después de un colapso de una represa de residuos mineros. El deslizamiento liberó una gran cantidad

de lodo contaminado con metales pesados, incluyendo hierro y manganeso. (Ambiental.net, 2015).

Además, según estudios realizados entre 2016 y 2021 y publicada en *Current Opinion in Toxicology*, los investigadores advierten sobre la alarmante falta de datos sobre el problema de la exposición a metales pesados en la región.

En habitantes de localidades colombianas y brasileras amazónicas se detectaron niveles de mercurio en cabello entre 17,3 µg/g, 10,6 µg/g y 23 µg/g, todos valores por encima de 1 µg/g, umbral establecido por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU. (Barrera, 2021).

En relación con el Plomo, en México, Brasil y Uruguay, la contaminación se explica a partir de exposiciones a residuos electrónicos, reciclaje de baterías, la mala gestión de la basura, actividades industriales y el consumo de agua y comida, etc. (Barrera, 2021).

Los mayores niveles de Plomo en sangre se hallaron en recicladores de baterías de Ciudad de México, a quienes se les midió, en promedio, 69 µg/dl (microgramos por decilitro). Según los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EEUU, a partir de los 5 µg/dl se considera que el nivel de este metal en sangre es alto. (Barrera, 2021).

A nivel nacional se tiene varios casos de contaminación en los cuerpos de agua por metales pesados tales como son el caso de la cuenca Poopó conformada por las subcuencas Desaguadero, Sora Sora, Huanuni, Poopó, Antequera, Peñas, Pequereque, Tacagua y Azanaques, donde se ha degradado la calidad de las aguas superficiales debido a la gran actividad minera que se encuentra en esta zona. (Mongabay, 2017).

En el marco del Programa de Apoyo al Desarrollo Sostenible, de la Embajada de Dinamarca, el Programa de Investigación Estratégica en Bolivia (PIEB) realizó el estudio Daño genotóxico por contaminación minera en Oruro. En este informe se señala que ríos como el río Poopó presentan concentraciones bastante considerables de metales pesados: valores como 0,6 mg/l de Cadmio, 0,27 mg/l de Plomo y 2,07 mg/l de Arsénico. (Medico-Juridica, 2022).

Según la Ley del Medio Ambiente 1333 en Bolivia y en su Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), para cuerpos de agua, indica los límites máximos permisibles para la clase A apta para consumo humano, para el Cadmio 0,005 mg/l, Plomo 0,05mg/l y Arsénico 0,05mg/l.

En Tarija existe la problemática de la presencia de metales pesados en varios cuerpos de agua, como es el caso del Río Pilcomayo (Los Tiempos, 2023) y un afluente del río Huacata, denominado quebrada La Mina, que se encuentra en el Municipio de San Lorenzo en la Provincia Méndez.

En marzo del 2011, se realizó una inspección ambiental en el área de influencia de construcción de la Presa Huacata por técnicos de la Dirección de Calidad y Servicios Ambientales dependiente del Gobierno Autónomo Departamental de Tarija. Ellos observaron la existencia de minas abandonadas con socavones abiertos, por lo que se supone que no siguieron procedimientos técnicos ni ambientales para el cierre y abandono de estas actividades. Observaron también la presencia de flujos de agua desde el interior de las minas con posibilidades de contener metales solubilizados y por estar dichos socavones muy próximos a las quebradas El Valle y La Mina los niveles de Plomo y Zinc resultaron ser elevados según los análisis de laboratorio. (Acceso, 2022).

Con la finalidad de combatir el problema en la gestión 2015 el Gobierno Autónomo Departamental de Tarija ordeno el sellado de 11 minas. Dicho proyecto fue entregado en octubre del mismo año sin embargo los desmontes con Plomo a orillas de la quebrada y las filtraciones a causa de la fisura de las rocas que encapsula el metal, demostraron que dicha medida no fue suficiente ya que según resultado de laboratorio la contaminación no se redujo a los niveles exigidos por ley. (Acceso, 2022).

Las mayores concentraciones de metales pesados que se encuentran sobre la quebrada La Mina son de metales como Plomo, Cadmio y Zinc. Según los resultados de laboratorio se tienen concentraciones máximas de Plomo de 0,91mg/l, Cadmio de 0,056 mg/l y Zinc de 42,65mg/l. De acuerdo con el Reglamento en Materia de

Contaminación Hídrica para la clase A los niveles de Plomo deben ser de 0,05mg/l, de Cadmio de 0,005mg/l y de Zinc 0,2mg/l. (SEDEGIA,2019).

Objetivo General

El objetivo general del trabajo es realizar el tratamiento del efluente de la Mina Perales ubicada en la zona Huacata, utilizando un biofiltro con Totorá (*Typha Domingensis*) a escala laboratorio.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las aguas del efluente de la Mina Perales en cuanto a Pb, Cd y Zn a la entrada del tratamiento en base al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) vigente.
- Evaluar el rendimiento del biofiltro: Totorá, agua y sustrato para la remoción de metales pesados.
- Caracterizar las aguas tratadas del efluente de la Mina Perales en cuanto a Pb, Cd y Zn a la salida del sistema de tratamiento en base al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) vigente.

Justificación

Justificación Técnica

Como se trata de lugares alejados del área urbana además de tomar en cuenta la fisiografía del lugar, los malos caminos y la distancia hacia la zona es necesario implementar tecnologías alternativas precisas que requieran muy poca o nula energía, cuya operación y mantenimiento sean simples, de funcionamiento estable y eficientes en su objetivo de remover los elementos contaminantes, ya que en un futuro el proceso tendría que ser operado por un comunario de la zona.

Las alternativas de biofiltros como un tratamiento secundario de aguas es una tecnología no convencional, de fácil mantenimiento y de operación, esto debido a que el biofiltro es un sistema que imita a los humedales (pantanos) naturales, donde las aguas residuales se depuran por procesos naturales.

Justificación Económica

La construcción de sistemas de tratamiento de aguas para la remoción de metales pesados en los pequeños municipios es muy limitada por motivos económicos: la implementación de sistemas convencionales como la precipitación química, electrocoagulación, electro floculación, etc. requieren fuertes inversiones.

Es por esta razón que debido a que los biofiltros son sistemas que actúan como humedales naturales donde el lecho filtrante es un material natural, son de bajo costo en su implementación y mantenimiento en comparación a los tratamientos convencionales.

Aunque los beneficios principales no son monetarios y por lo tanto no se puede pensar en términos de recuperación monetaria de la inversión realizada, los beneficios principales se logran en términos de salud y mejoras al medio ambiente, los que también tienen un componente económico que hay que considerar.

Justificación Social

La quebrada "La Mina" alimenta el río Huacata, la misma que alimenta a la represa de Huacata, que se construyó con dos objetivos: agua para riego y agua para consumo humano.

La presencia de metales pesados en un afluente del río Huacata pone en riesgo la calidad de agua de la represa ya que se perdería la aptitud de la misma. Por otro lado, la presencia de metales pesados pone en riesgo la disponibilidad del agua de la represa.

La fauna circundante al cuerpo de agua con metales pesados como ser ganado vacuno y ovino es afectada, ya que ésta al consumir agua directamente de la quebrada puede adquirir niveles elevados de metales pesados como el Plomo, Cadmio y Zinc por lo que la población del lugar corre el riesgo de ingerir carne contaminada.

Al implementarse un tratamiento de metales pesados, se contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas y animales que viven en los alrededores.

Justificación Ambiental

Se sabe que el agua es uno de los recursos naturales más importante y valioso ya que es un recurso esencial para los procesos vitales de los seres vivos.

Los últimos años este recurso se ha visto muy perjudicado por la contaminación debido a la actividad antrópica, tanto a nivel doméstico, empresarial como industrial.

La implementación de los diferentes tipos de industrias muchas veces solo toma en cuenta el desarrollo del proceso productivo sin tomar en cuenta el daño que puede ocasionar el medio ambiente.

En este caso es sobre la quebrada la Mina que existen varias minas que fueron explotadas hace muchos años sin ningún tipo de cuidado y es por esto que en una de estas minas hubo fractura de la roca que contiene a los minerales y a pesar que fue sellada al igual que las otras, el agua se infiltra y escapa a través de la fractura de la roca arrastrando consigo los metales pesado las cuales como ya se mencionó son extremadamente peligrosos para la salud y el medio ambiente.(Llanos, 2021)

Entonces el implementar un biofiltro es una manera de poder recuperar este tan importante recurso como lo es el agua.

Además, esta tecnología es amigable con el medio ambiente, ya que sus principales componentes son materiales naturales como la Totorá y la grava.

Justificación Personal

El presente trabajo tiene la finalidad de cumplir como requisito para culminar la etapa estudiantil de la Carrera de Ingeniería Química y poder obtener el Título Académico de Licenciatura en Ingeniería Química en Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Así mismo poder contribuir con una solución al problema social y ambiental de la zona de Huacata.

CAPITULO I
MARCO TEORICO

1.1 Marco Legal

1.1.1 Ley de Medio Ambiente (Ley 1333)

La presente Ley tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población. (Ley 1333, 1992).

1.1.1.1 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)

El presente Reglamento se aplica a toda persona natural o colectiva, pública o privada, cuyas actividades industriales, comerciales, agropecuarias, domésticas, recreativas y otras, puedan causar contaminación de cualquier recurso hídrico.

1.1.1.2 Clasificación de los Cuerpos de Agua, su Aptitud y su Utilidad

Según la Ley 1333, la clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos:

CLASE “A” Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

CLASE “B” Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

CLASE “C” Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.

CLASE “D” Aguas de calidad mínima, que, para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales. (Anexo 1)

1.1.2 Norma Boliviana NB-512 “Agua Potable”

La Norma Boliviana NB-512 tiene por objetivo establecer los valores máximos aceptables de los diferentes parámetros, que aseguran la calidad del agua abastecida para uso y consumo humano.

Define al agua potable como aquella que, por sus características organolépticas, físico-químicas, radiológicas y microbiológicas, se considera apta para el consumo humano y que cumple con lo establecido en la presente norma y establece al valor máximo aceptable como aquel valor establecido para los diferentes parámetros, el cual no debe ser excedido para no incidir en la salud humana. (Anexo 1).

1.1.3 Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM)

Del manejo de aguas:

El concesionario u operador minero está sujeto a las disposiciones establecidas en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, aprobado mediante D.S. 24176 de 8 de diciembre de 1995 y las disposiciones del presente título.

1.1.4 Guías para la Calidad del Agua de Consumo OMS

La finalidad principal de las Guías para la calidad del agua de consumo humano es la protección de la salud pública. Las Guías proporcionan las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para gestionar el riesgo de los peligros que pueden comprometer la seguridad del agua de consumo humano.

La mayoría de las sustancias químicas presentes en el agua de consumo humano son potencialmente peligrosas para la salud sólo después de una exposición prolongada (durante años, más que meses).

Los contaminantes químicos en el agua de consumo humano se pueden clasificar de varias maneras; sin embargo, lo más adecuado es considerar la fuente principal del contaminante, es decir, agrupar las sustancias químicas en función del factor que se puede controlar de manera más efectiva.

Tabla I-1. Caracterización de Fuentes de Componentes Químicos

Fuente de componentes químicos	Ejemplos de fuentes
Origen natural.	Rocas, suelos y los efectos del marco geológico y el clima; masas de agua eutróficas (también influenciados por el vertido de aguas residuales y la escorrentía agrícola).
Fuentes industriales y núcleos habitados.	Minería (industrias extractivas) e industrias de fabricación y procesamiento, aguas residuales (incluidos una serie de contenidos que son motivo de preocupación), residuos sólidos, escorrentía urbana, fugas de combustibles.
Actividades agropecuarias.	Estiércoles, fertilizantes, prácticas de ganadería intensiva y plaguicidas.
Tratamiento del agua o materiales en contacto con el agua de consumo humano.	Coagulantes, SPD, materiales de tuberías.
Plaguicidas añadidos al agua por motivos de salud.	Larvicidas utilizados en el control de insectos vectores de enfermedades.

Fuente: OMS, 2004

1.2 Marco Conceptual

1.2.1 Contaminación de Aguas Superficiales por Metales Pesados

En la actualidad se estima que son más de un millón de sustancias diferentes las que son introducidas en las aguas naturales a través de los vertidos antropogénicos. Muchas de ellas no son consideradas tóxicas, si bien pueden alterar las características

organolépticas del agua o perturbar severamente el ecosistema. Otras, en cambio, si son directamente nocivas para los seres vivos. (Tabti, 2014).

Los problemas de contaminación de las aguas tienen su origen en la Revolución Industrial, hace aproximadamente unos 200 años y como resultado un rápido aumento de la población mundial. La industrialización condujo a una urbanización muy localizada creando problemas en cantidad y en la calidad de agua disponible. (Tabti, 2014).

Los cursos naturales de agua han sido desde tiempo inmemorial los receptores, directos o indirectos, de los desechos líquidos que el hombre ha generado debido a su propia actividad. En un principio, eran capaces de soportar las cargas contaminantes que a los ríos se vertían merced a su carácter autodepurador. Posteriormente, al crearse grandes asentamientos urbanos, se incrementó notablemente la cuantía de los vertidos. En consecuencia, en los cursos fluviales se produjeron graves alteraciones en la calidad de sus aguas. (Tabti, 2014).

Desde entonces, los esfuerzos para lograr la eliminación de los contaminantes generados por el hombre no han sido capaces de ajustarse ni al ritmo de incremento en la cantidad de desechos industriales, ni al crecimiento demográfico. Esto a menudo ha provocado la transformación de las aguas de ríos, lagos y costas en depósitos de residuos en los que el equilibrio natural está seriamente perturbado y en muchos casos totalmente roto. (Tabti, 2014).

Al contrario que muchos contaminantes orgánicos los metales pesados, generalmente no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales debido a que no son biodegradables. Por el contrario, son muy contaminantes y sufren un ciclo global ecológico, donde las aguas naturales son el principal camino. Debido a la toxicidad y muy especialmente a su comportamiento bioacumulativo, el contenido en metales pesados tiene un gran significado como indicador de la calidad ecológica de todo flujo de agua. (Tabti, 2014).

Asimismo, los metales pesados tienen tendencia a formar compuestos, con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, por lo que se acumulan en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de ríos, lagos y mares. (Tabti, 2014).

Las altas concentraciones de metales pesados en las aguas de corrientes fluviales asociados a sulfuros tales como el As, Cd, Cu, Pb y Zn pueden atribuirse a la minería y son causa del fuerte impacto en el medio ambiente. En cambio, otros metales no-sulfurosos como el Cr, Ni y Hg posiblemente indican una contaminación antropogénica de metales pesados que están estrechamente asociados con las descargas industriales. (Tabti, 2014).

1.2.2 Metales pesados que contaminan las aguas superficiales

Varios metales pesados pueden contaminar las aguas superficiales, y su presencia puede tener impactos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Algunos de los metales pesados más comúnmente asociados con la contaminación del agua son:

1.2.2.1. Plomo

El Plomo es un elemento químico de la tabla periódica, cuyo símbolo es Pb (del Latín, Plumbum), y su número atómico es 82.

El Plomo es un metal pesado de densidad relativa o gravedad específica 11,4 a 16°C, de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico y se funde con facilidad. Su fusión se produce a 327,4°C y hierve a 1,725°C. Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de ácido sulfúrico y ácido clorhídrico, aunque se disuelve con lentitud en ácido nítrico y ante la presencia de bases nitrogenadas. El Plomo es anfótero, ya que forma sales de Plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. Tiene la capacidad de formar muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos. (Quimica.es, 2013).

El envenenamiento por Plomo provoca la enfermedad llamada saturnismo. El saturnismo genera anemia, debido a que el Plomo en la sangre bloquea la síntesis de

hemoglobina y altera el transporte de oxígeno a la sangre y hacia los demás órganos del cuerpo. El Plomo llega a sustituir a metales como calcio y hierro en las enzimas de nuestro cuerpo, provocando que no cumplan debidamente sus funciones enzimáticas. El Plomo cuando está presente en la sangre, circula por todo el organismo ocasionando daños neurológicos irreversibles al llegar al cerebro. Niveles entre 60 y 70 microgramos de Plomo por litro de agua ocasionan dolores de cabeza, problemas de concentración y de memoria, dificultades con el sueño y cambios de carácter repentinos. (OMS, 2004).

Por otro lado, el Plomo limita la síntesis clorofílica de las plantas. No obstante, las plantas pueden absorber del suelo altos niveles de Plomo, hasta 500 ppm, sin embargo, de esta forma el Plomo se introduce en la cadena alimenticia. (OMS, 2004).

La concentración de Plomo recomendada por la OMS es de 0,01 mg/l, valor sobre el cual se mantiene la mayoría de los países americanos, en total el 63,15%. República Dominicana, Argentina, Brasil, Chile y Uruguay por su parte permiten un límite máximo de 0,05 mg/l excediendo la recomendación de la OMS. México y los Estados Unidos también admiten valores superiores a los recomendados por la OMS con un 0,025 mg/l y un 0,015 mg/l respectivamente. Estos países conforman el 36,84% del total. Ningún país establece su límite con niveles inferiores al recomendado. (Truque, 2015).

1.2.2.2 Arsénico

El Arsénico es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es As y el número atómico 33. Raramente se presenta de forma sólida, aunque pertenece al grupo de los semimetales, ya que muestra propiedades metálicas y no metálicas. Presenta tres estados alotrópicos, gris metálico, amarillo y negro. (PRTR, España, 2022).

El Arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico. (OMS, 2022).

Las personas están expuestas a niveles elevados de Arsénico inorgánico a través del consumo de agua contaminada, el uso de agua contaminada en la preparación de alimentos y el riego de cultivos alimentarios, los procesos industriales, la ingestión de alimentos contaminados y el consumo de tabaco. (OMS, 2022).

La exposición prolongada al Arsénico inorgánico, principalmente a través del agua de bebida y los alimentos puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel. (OMS, 2022).

1.2.2.3 Mercurio

El Mercurio es un elemento natural que se encuentra en la roca de la corteza terrestre, como en los depósitos de carbón. En la tabla periódica, tiene el símbolo "Hg" y el número atómico es 80. (EPA, 2023).

El Mercurio elemental o metálico es un metal plateado brillante y líquido a temperatura ambiente. Se utiliza en los termómetros viejos, bombillas de luz fluorescente y algunos interruptores eléctricos. (EPA, 2023).

El mayor efecto negativo de la contaminación ambiental por Mercurio se produce a nivel acuático, debido a que el metilmercurio (toxina muy potente para el pescado) se acumula en la vida acuática con el tiempo en concentraciones y niveles más elevados. (agua, 2008).

Algunas de las fuentes comunes de contaminación del agua por Mercurio son por emisiones atmosféricas, minería de oro, desbordes de embalses, descomposición de residuos, descargas industriales, etc. (agua, 2008).

La exposición al Mercurio, especialmente en forma de metilmercurio, puede tener efectos perjudiciales para la salud humana. Algunos de los efectos en la salud asociados con la exposición al mercurio son toxicidad neurológica, problemas renales, problemas cardiovasculares, problemas reproductivos, etc. (agua, 2008).

1.2.2.4 Zinc

El Zinc o Cinc es un elemento químico de número atómico 30 y símbolo Zn situado en el grupo 12 de la tabla periódica de los elementos. (Quimica.es, 2013)

Es un metal de color blanco azulado que arde en aire con llama verde azulada. El aire seco no le ataca pero en presencia de humedad se forma una capa superficial de óxido o carbonato básico que aísla al metal y lo protege de la corrosión. (Quimica.es, 2013).

El Zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Los bajos niveles de Zinc pueden provocar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor, pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. El cuerpo humano puede manejar cantidades importantes de Zinc, pero si es demasiado, puede causar problemas de salud como úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles altos de Zinc pueden dañar el páncreas, causar disturbios en el metabolismo de las proteínas y causar arteriosclerosis. (OMS, 2004).

1.2.2.5 Cromo

La contaminación del agua por Cromo puede ocurrir debido a descargas industriales, desechos urbanos, y otras actividades humanas. El Cromo se presenta en varias formas, y la forma más preocupante en términos de toxicidad es el Cromo hexavalente (Cr (VI)), que es más soluble y móvil en el agua que el Cromo trivalente (Cr (III)).

El Cromo es un elemento químico de número atómico 24 que se encuentra en el grupo 6 de la tabla periódica, y se caracteriza por ser un metal de transición duro, frágil, de color gris acerado y muy resistente a la corrosión. (PRTR, 2020).

El Cromo (VI) o hexavalente es un verdadero problema ambiental y de salud. A nivel ambiental, una vez que llega al agua puede tener efectos sobre los peces, provocándoles problemas en las agallas afectando su respiración, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores. (water, 2013)

En el caso del ser humano, los principales efectos se dan a nivel cutáneo, con la aparición de erupciones; a nivel gástrico, con problemas de estómago y úlceras; problemas respiratorios; debilitamiento del sistema inmune; daño en

los riñones e hígado y sobre todo a nivel genético y epigenético, donde terminará provocando la aparición de cáncer si la exposición a él es continua en nuestra vida. (water, 2013).

1.2.2.6 Cadmio

El Cadmio es un elemento químico de número atómico 48 situado en el grupo 12 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Cd. Es un metal pesado, blanco azulado, relativamente poco abundante. Es uno de los metales más tóxicos, aunque podría ser un elemento químico esencial, necesario en muy pequeñas cantidades, pero esto no está claro. (Quimica.es, 2013).

El Cadmio forma parte de la composición natural de algunas rocas y suelos. Por vía antrópica las concentraciones en el ambiente pueden ser incrementadas considerablemente, ya que es un metal ampliamente utilizado en la industria y productos agrícolas. La población está expuesta al Cadmio a través del agua y la ingesta de comida contaminada con este elemento (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado), por la inhalación de partículas durante actividades industriales en personas laboralmente expuestas, por el cigarrillo, cuyo nivel de Cadmio está asociado al suelo donde crece el tabaco. Finalmente, por vía dérmica, aunque las concentraciones absorbidas son muy reducidas. El Cadmio que ingresa por vía respiratoria o por vía oral, se transporta a la sangre y se concentra en el hígado y el riñón. El Cadmio tiene la capacidad de acumularse en estos órganos vitales lo que produce daños irreversibles. (OMS, 2004).

El nivel establecido por la OMS es de 0,003 mg/l el cual es adoptado por el 38,88% de los países en América. El 61,11% restante permite concentraciones mayores de este metal, aunque siguiendo una tendencia muy pareja que va en los 0,05 mg/l. Sin embargo, Costa Rica y Nicaragua presentan una desviación al permitir un nivel de Cadmio en el agua de 0,05 mg/l. (Truque, 2015).

1.2.2.7 Níquel

El Níquel es un elemento químico de número atómico 28 y símbolo Ni, situado en el grupo 10 de la tabla periódica de los elementos. (Quimica.es, 2013).

La contaminación del agua por níquel puede ocurrir debido a diversas actividades humanas, especialmente aquellas relacionadas con la minería, la industria y la liberación de desechos. (Calva & Torres, 2003).

La exposición al Níquel puede tener varios efectos en la salud, dependiendo de la cantidad a la que una persona está expuesta, la forma y la duración de la exposición. Algunos de los posibles efectos en la salud son irritación en la piel, dermatitis, problemas respiratorios, problemas gastrointestinales, efectos sobre el sistema cardiovascular, etc. (Calva & Torres, 2003).

1.2.3 Fuentes de Contaminación de Aguas Superficiales por Metales Pesados

Las fuentes de contaminación de aguas superficiales por metales pesados son diversas y pueden clasificarse en fuentes antropogénicas (causadas por actividades humanas) y fuentes naturales.

- Fuentes Naturales:
 - **Erosión del Suelo:** La erosión natural del suelo puede liberar metales pesados presentes en minerales y rocas hacia los cuerpos de agua. Este proceso puede aumentar con prácticas agrícolas no sostenibles.
 - **Actividad Volcánica:** La actividad volcánica puede liberar metales pesados presentes en las rocas volcánicas hacia los cuerpos de agua, especialmente cuando hay erupciones.
 - **Fuentes Geotérmicas:** En áreas con actividad geotérmica, el agua que fluye a través de depósitos minerales puede transportar metales pesados hacia los cuerpos de agua.
 - **Depósitos Naturales:** Algunos cuerpos de agua pueden tener depósitos naturales de metales pesados, y las concentraciones pueden aumentar debido a factores como cambios en la acidez del agua.

- **Fuentes Antropogénicas:**
 - **Minería:** Las operaciones mineras pueden liberar metales pesados al agua a través de la lixiviación de minerales expuestos durante la extracción. Además, los desechos mineros y las escorrentías pueden transportar metales pesados hacia los cuerpos de agua.
 - **Industria:** Las descargas industriales, ya sea directamente al agua o a través de sistemas de alcantarillado, pueden contener metales pesados. Las industrias metalúrgicas, químicas y de fabricación son fuentes comunes de contaminación.
 - **Agricultura:** El uso de fertilizantes y pesticidas puede contribuir a la contaminación del agua con metales pesados. Algunos fertilizantes contienen metales, y los pesticidas pueden movilizar metales presentes en el suelo.
 - **Residuos Urbanos:** Los desechos sólidos urbanos, incluyendo productos electrónicos y pilas, pueden liberar metales pesados cuando se descomponen en vertederos. Además, las aguas residuales urbanas pueden contener metales de diversas fuentes.
 - **Vertidos de Agua Pluvial:** Las aguas pluviales que fluyen sobre superficies urbanas y carreteras pueden arrastrar metales pesados, como el Plomo y el Zinc, hacia los cuerpos de agua.
 - **Desgaste de Vehículos:** El desgaste de componentes de vehículos, como frenos y neumáticos, puede liberar partículas de metales pesados, que luego son transportadas por las aguas pluviales. (Dorronsoro & Garcia, 2000).

1.2.4 Contaminación de Aguas en Actividades Mineras

La contaminación de los cuerpos de agua en las actividades mineras es producida principalmente por descargas directas e indirectas (rebalses e infiltraciones) de aguas ácidas de mina (DAM), de efluentes o aguas residuales de operaciones mineras y

procesos metalúrgicos, de drenajes de áreas de acumulación de residuos (DAR) así como de talleres y de aguas servidas de campamentos. (Minería, 2001).

Los cuerpos de agua pueden ser física y/ o químicamente alterados o cambiados por las operaciones mineras y procesos metalúrgicos. En cuerpos de agua superficiales; arroyos, ríos, lagunas, lagos los cambios físicos pueden advertirse visualmente. En cuerpos de agua subterráneos; acuíferos en general los cambios físicos (vacío, creación de zonas de baja presión, cambio de dirección de flujo, sobrecarga, penetración en otros estratos, mezcla de acuíferos, etc.), no siempre se pueden advertir visualmente por lo que se requiere de sondeos, pruebas y estudios para su control. (Minería, 2001).

El efecto más serio es el físico químico: incremento de acidez, elevadas concentraciones de metales pesados y reactivos, materiales en suspensión, efecto en los sedimentos de fondo, etc. Estos efectos son generalmente adversos y limitan el uso de los cuerpos de agua contaminados, afectando directamente a la vida acuática, a los humanos y animales al consumir agua contaminada, o indirectamente (vía cadena alimenticia), al consumir productos de cultivos irrigados con aguas contaminadas y consumiendo peces cuyos organismos están contaminados con metales pesados. (Minería, 2001).

1.2.5 Efluentes Mineros

Los relaves mineros son la principal fuente de contaminación debido a la presencia de metales pesados, que repercuten en el sistema ecológico y en la salud humana. (Metalúrgia, 2021).

1.2.5.1 Fuentes de Efluentes Mineros

- Procesos Minero-Metalúrgicos
 - Agua de relaves.
 - Flujos ácidos del proceso.
 - Lixiviación de metales por cianuro.

– Drenaje ácido de mina (DAM) e infiltración.

(Metalúrgia, 2021).

- Sitios Mineros

– Drenaje ácido de roca (DAR) e infiltración.

(Metalúrgia, 2021).

1.2.5.1.1 Drenaje Acido de Mina (DAM)

El Drenaje Ácido de Mina (DAM) es el flujo de contaminación química inorgánica de agua de mina resultante de la oxidación de sulfuros y disolución de componentes solubles de minerales existentes en el yacimiento. Los efluentes ácidos que se producen contienen niveles elevados de metales disueltos que incluyen Hierro, Zinc, Cobre, Cadmio, Manganeso y Plomo. (Minería, 2001).

El DAM ocurre tanto en aguas de minas subterráneas como en aguas de minería a cielo abierto. (Minería, 2001).

1.2.5.1.2 Drenaje Acido de Roca (DAR)

El DAR ocurre en desmontes de rocas que contienen sulfuros y en las acumulaciones de residuos sólidos (colas) de procesos de concentración de menas que contienen sulfuros. (Minería, 2001).

El Drenaje Ácido de Roca (DAR), o de residuo minero-metalúrgico, es el flujo de contaminación química inorgánica (a aguas superficiales, aguas subterráneas y a suelos) que se origina por efecto o de la exposición de rocas y residuos minero-metalúrgicos sulfurosos a condiciones de oxidación en la intemperie, por precipitaciones atmosféricas, o por aguas superficiales. (Minería, 2001).

Las concentraciones reales de metales en el DAR están regidas por factores dependientes del lugar, como flujo de aireación, bacterias oxidantes, flujo de agua y presencia de agentes neutralizantes. Por ello, para poder prever las descargas futuras de metales de los desmontes, colas de concentración n y otros residuos de actividades

mineras, es necesario investigar todos los parámetros relevantes del material que influyen en los procesos de oxidación y lixiviación. (Minería, 2001).

Independientemente de la fuente que da origen a los drenajes de mina, éstos se pueden subdividir en dos grandes grupos:

- Drenajes alcalinos o aguas residuales con bajo potencial de solubilización.
- Drenajes ácidos o aguas residuales con alto potencial de solubilización.

En 1968 White hace una clasificación de las aguas residuales de mina en función al pH y los agrupa en 6 categorías:

Tabla I-2. Clasificación de las Aguas Residuales de Mina en Función al pH

Clase	pH
Altamente acidas	1,5 a 4,5
Blandas, ligeramente acidas	5,0 a 7,0
Duras, neutras a alcalinas	7,0 a 8,5
Blandas, alcalinas	7,5 a 11,0
Muy salinas	6,0 a 9,0
Blandas acidas	3,5 a 5,5

Fuente: White, 1968

1.2.6 Métodos de Tratamiento de Metales Pesados

Se han desarrollado técnicas especialmente para el tratamiento y remoción de este tipo de elementos contaminantes del medio acuoso, estas técnicas pueden considerarse como convencionales y las técnicas no convencionales.

A continuación, se describirán de manera rápida algunas de ellas:

1.2.6.1 Técnicas Convencionales

1.2.6.1.1 Filtración por Membrana

Esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Taylor & Wiesner, 2002).

La separación por membrana se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción alimentos y bebidas y en la explotación y producción de hidrocarburos (Nemerow & Dasgupta, 1998).

Las técnicas como la microfiltración, nanofiltración y la ultrafiltración son ejemplos de algunas de las técnicas de remoción que son llevadas a cabo por el método de la filtración por membranas.

1.2.6.1.2 Intercambio Iónico

Es el proceso a través del cual los iones en solución se transfieren a una matriz sólida que, a su vez liberan iones de un tipo diferente, pero de la misma carga. El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifiquen químicamente. Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas. (Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez, & Sandoval, 2015).

1.2.6.1.3 Adsorción (Convencional)

La técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo de adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo.

Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, Zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química (Liu & Lee, 2011).

1.2.6.1.4 Precipitación Química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar, económica y selectiva, aunque su mantenimiento si es costoso debido a la alta generación de lodos. Presenta tratamientos como precipitación de hidróxido, técnica de bajo costo, fácil control del pH y eliminación por floculación y sedimentación (Huisman, Schouten, & Schultz, 2006).

1.2.6.1.5 Electrocoagulación

Es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional, induciendo la corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de Hierro o Aluminio (Morante, 2002).

1.2.6.1.6 Flotación

El proceso de flotación ion se basa en impartir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de agentes activos de superficie (tensoactivos) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire (Polat & Erdogan, 2007)

1.2.6.2 Técnicas No Convencionales

1.2.6.2.1 Adsorbentes de Bajo Costo y Nuevos Adsorbentes

La adsorción es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido. El proceso de sorción describe en realidad un grupo de procesos, que incluyen la adsorción y las reacciones de precipitación. Se emplea un amplio espectro de materiales biológicos, especialmente

las bacterias, algas, levaduras y hongos han recibido una atención creciente para la eliminación y recuperación de metales pesados, debido a su buen rendimiento, bajo coste y grandes cantidades disponibles. (Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodriguez, & Sandoval, 2015).

1.2.6.2.2 Biopolímeros

Son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros. Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos. (Barakat, 2011).

1.2.6.2.3 Hidrogeles

Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales (Barakat, 2011).

1.2.6.2.4 Fitorremediación

Es el uso de las plantas y los microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en los ambientes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente, respetuoso del medio ambiente. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (Delgadillo, Gonzales , Prieto, Villagomez, & Acevedo, 2011).

1.2.7 Fitodepuración

“Fitodepuración es un término que se basa específicamente en la depuración de las aguas residuales, a diferencia del término fitorremediación que se basa en la limpieza o recuperación de ambientes acuáticos contaminados”. “También se puede definir como un sistema de tratamiento de aguas residuales, en la cual se usa la capacidad de

las macrófitas para contribuir en la reducción de los contaminantes” (Saveedra Castillo, 2017).

En resumen, la fitodepuración es el tratamiento de aguas residuales por medio de macrófitas. Esta se clasifica dependiendo de la parte de la planta o los microorganismos que contribuyen con la degradación de contaminantes (Carhuaricra Ferrer, 2019).

Tabla I-3. Clasificación de la Fitodepuración

Tipo	Proceso
Fitoextracción	La concentración de los contaminantes que se encuentran en el agua residual, principalmente se canaliza en la parte aérea.
Rizofiltración	Esta hace referencia al tratamiento de las aguas residuales mediante las raíces de las macrófitas; tienen propiedades que absorben, precipitan y concentran los contaminantes. También degradan los compuestos orgánicos.
Fitoestimulación	En este caso la planta, mediante el uso de los exudados radiculares remueven los hongos y bacterias.
Fitoestabilización	En este caso la planta, mediante el uso de los exudados radiculares remueven los hongos y bacterias.
Fitodegradación	En este caso, las plantas tienen la propiedad de captar, almacenar y degradar los compuestos orgánicos, estos llegan a convertir en productos o subproductos menos tóxicos.
Fitovolatilización	Las plantas tienen la propiedad de captar y modificar el contaminante orgánico para luego ser liberados mediante transpiración.

Fuente: Arias Martínez, Betancur Toro, Gomez Rojas, Salazar Giraldo, & Hernandez Angel, 2010

1.2.8 Humedales

Los humedales son sistemas de fitodepuración de aguas; son áreas que se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y una comunidad viviente (plantas y animales) adaptados a la vida en agua o en un suelo saturado. (Garcia, 2004).

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales:

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan. (Garcia, 2004).

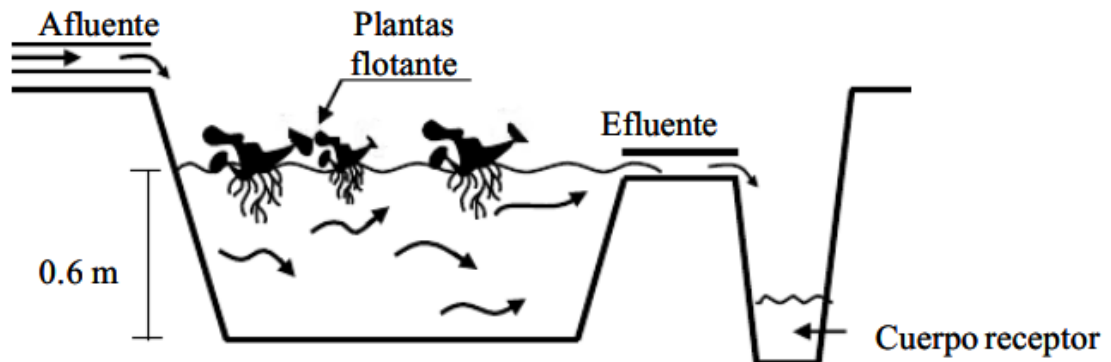
1.2.8.1 Clasificación de los Humedales Artificiales

1.2.8.1.1 Humedales Artificiales con Superficie de Agua Libre

1.2.8.1.1.1 Sistemas con Macrófitas Flotantes

Consiste de grandes lagunas con bajos niveles de agua provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie y sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo. El concepto de tratamiento se basa principalmente en la recolección de la biomasa producida, siendo las plantas más utilizadas *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) y *Pistia stratiotes* (Lechuga de agua). (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005)

Figura 1-1. Sistemas con Macrófitas Flotantes

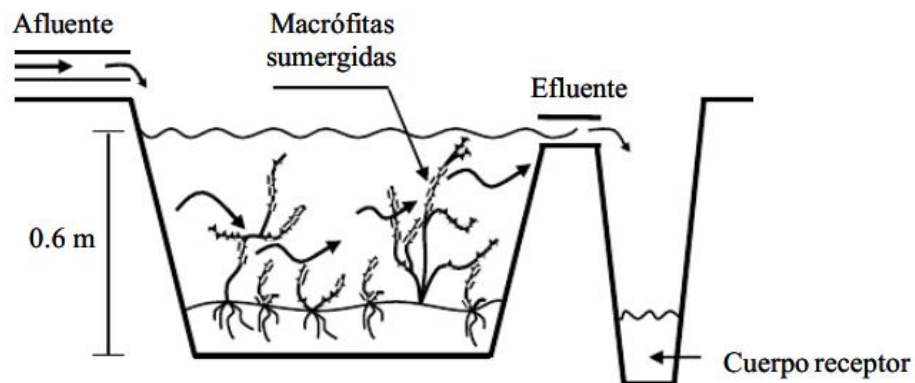


Fuente: Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005

1.2.8.1.1.2 Sistemas con Macrófitas Sumergidas

Consiste en lagunas con bajo nivel de agua plantadas con plantas macrófitas que tienen su tejido fotosintético totalmente sumergido. Las plantas sumergidas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo tanto, no se usan en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica biodegradable porque la descomposición microbiana de ésta provoca condiciones anóxicas. Además, depende de penetración de la luz a través del agua para que se produzca actividad fotosintética, por lo que se utilizan principalmente para tratamiento terciario (remoción de nutrientes). (Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

Figura 1-2. Sistemas con Macrófitas Sumergidas

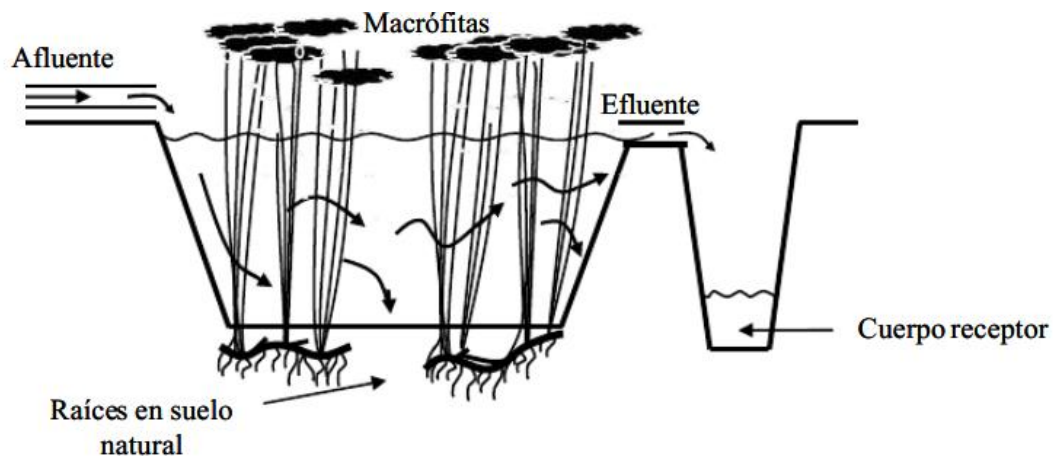


Fuente: Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005

1.2.8.1.1.3 Sistemas con Macrófitas Emergentes

El diseño de este sistema con superficie libre de agua consiste en trincheras de 3 - 5 m de ancho y cientos de metros de longitud, plantadas. El tratamiento biológico de las aguas residuales es favorecido por la presencia de porciones sumergidas de tallos y paja, los cuales sirven como sustrato para el crecimiento microbiano. (Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

Figura 1-3. Sistemas con Macrófitas Emergentes



Fuente: Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005

1.2.8.1.2 Humedales Artificiales de Flujo Subterráneo

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes es el que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (p.e. piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante. Las bacterias, las cuales son responsables de la degradación de la materia orgánica, utilizan la superficie del lecho filtrante para la formación de una película bacteriana y de esta manera existe en el filtro una población bastante estable que no puede ser arrastrada hacia la Salida. (Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

Los humedales de este tipo son conocidos como SSFW por sus siglas en inglés y en Nicaragua se les dio el nombre de Biofiltros. Una vez instalado y operado adecuadamente, un Biofiltro tiene una vida útil prolongada, ya que es un ciclo de vida renovable, donde existe un equilibrio entre el crecimiento y muerte de las plantas y la reproducción de la masa bacteriana. (Centro de Investigacion y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

1.2.9 Biofiltros

Un biofiltro es un humedal artificial de flujo subterráneo, en el que plantas, microorganismos y un material poroso, remueven los contaminantes del agua. Para que los biofiltros puedan funcionar bien estos deben tener buenas propiedades de filtrado, absorción de contaminantes y / o la capacidad de transformación de los contaminantes por parte de las plantas y microorganismos asociados. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade , 2010).

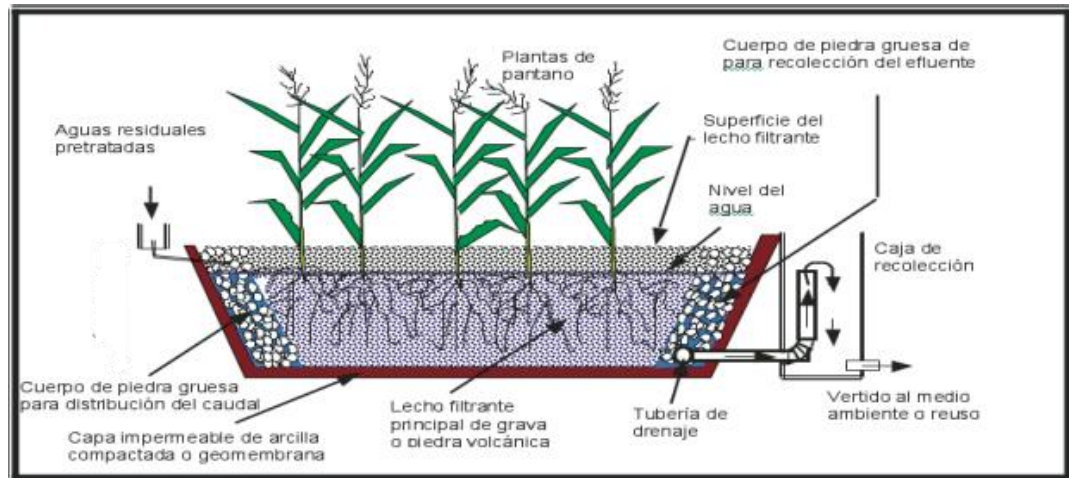
Los biofiltros se clasifican en Biofiltros de flujo horizontal y Biofiltros de flujo vertical, dependiendo de la forma en que las aguas residuales pretratadas atraviesen el lecho filtrante.

1.2.9.1 Biofiltro de Flujo Horizontal

Un Biofiltro de flujo horizontal (BFH) consiste de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, rellenas con grava o piedra volcánica y sembradas con plantas macrófitas. (Thurmhofer, y otros, 2006).

El esquema siguiente muestra los principales componentes de un Biofiltro de flujo horizontal:

Figura 1-4. Biofiltro de Flujo Horizontal



Fuente: Thurmhofer, y otros, 2006

En este tipo de Biofiltro, las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta que llegan a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido que dura normalmente varios días, el agua residual está en contacto con zonas aeróbicas y anaeróbicas, de las cuales las zonas aeróbicas están ubicadas alrededor de las raíces de las macrófitas, mientras que las zonas anaeróbicas están ubicadas en las áreas lejanas a las raíces. (Thurmhofer, y otros, 2006).

Para mantener la eficiencia del sistema durante muchos años y evitar la obstrucción de los poros del lecho filtrante se necesita normalmente un pretratamiento eficiente, que incluye la separación de material grueso, nata flotante y sólidos sedimentables y suspendidos. (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

1.2.9.2 Biofiltro de Flujo Vertical

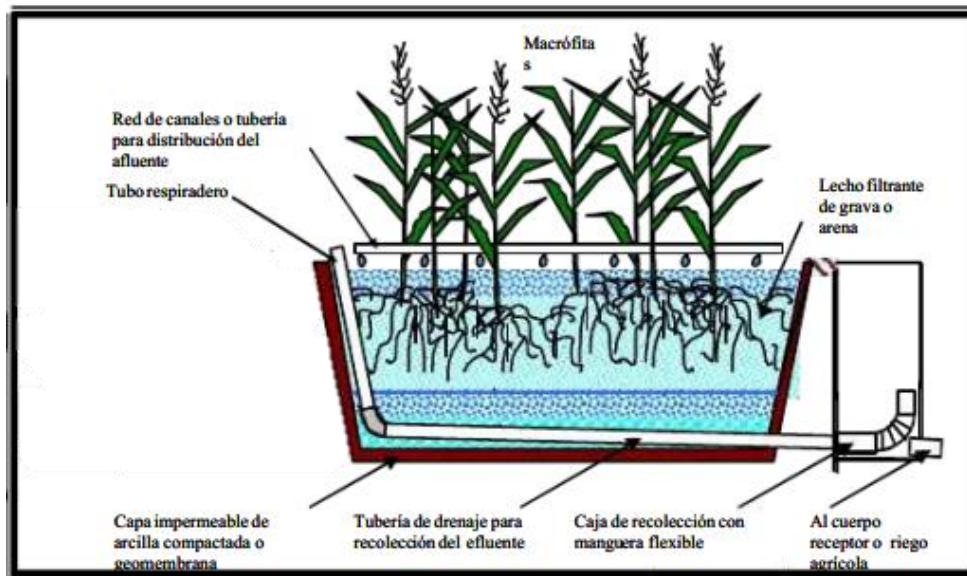
Un biofiltro de flujo vertical (BFV) consiste en pilas de aproximadamente 1 m de profundidad, rellenas con grava o piedra volcánica dispuestas en capas de diferente espesor y granulometría. Las aguas pretratadas se distribuyen uniformemente de forma continua, sobre toda la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección. La alimentación debe ser lo suficientemente grande para permitir que toda

el agua haya percolado y los espacios vacíos del lecho hayan sido ocupados por aire, de forma que con la próxima descarga el aire atrapado junto con una rápida dosificación conduzca a una buena transferencia de oxígeno. (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

Las plantas macrófitas sembradas en la superficie también suministran oxígeno, pero su principal función es mantener la conductividad hidráulica en el lecho. Este tipo de biofiltro se utiliza fundamentalmente para lograr una buena nitrificación. (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

El siguiente esquema muestra la conformación y los componentes principales de un Biofiltro de flujo vertical:

Figura 1-5. Biofiltro de Flujo Vertical



Fuente: Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005

1.2.9.3 Componentes Principales de un Biofiltro

1.2.9.3.1 Lecho Filtrante

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para

permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos. El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal.
- La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

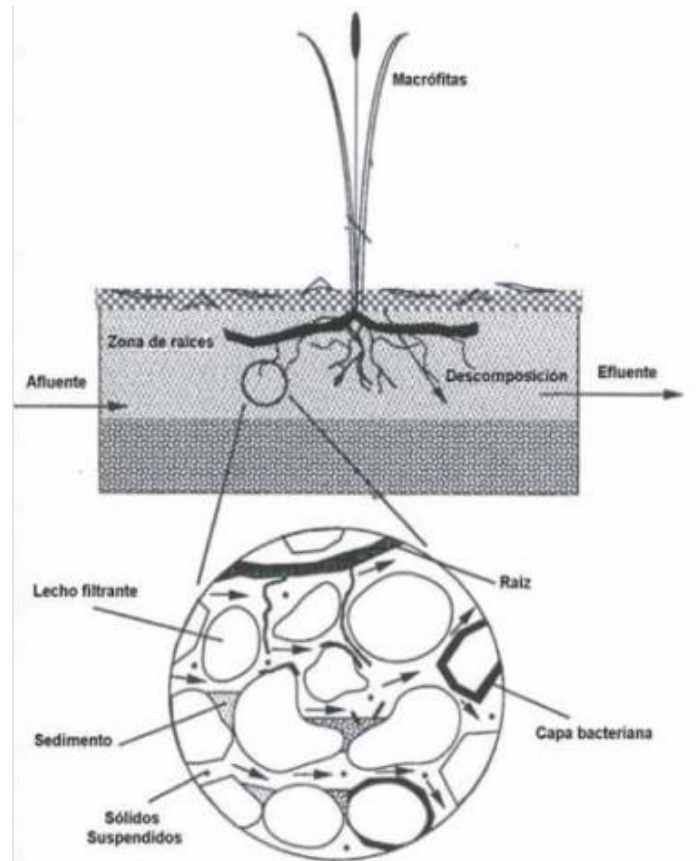
El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar.

Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de

microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas). (Thurmhofer, y otros, 2006).

Figura 1-6. Componentes Principales de un Biofiltro



Fuente: Thurmhofer, y otros, 2006

1.2.9.3.2 Plantas Macrófitas

Las funciones que cumplen las plantas en los procesos de tratamiento de aguas residuales las convierten en componente esencial del biofiltro. Así, las raíces de las plantas ayudan a incrementar los efectos físicos tales como la filtración y el desarrollo de los microorganismos en su área superficial.

La introducción de oxígeno en el lecho filtrante permite la formación de una población microbiana aeróbica en zonas cercanas a las raíces de las plantas. Las macrófitas cumplen otras funciones dentro del sitio específico, tales como proveer un hábitat conveniente para la vida silvestre y proporcionar al sistema una apariencia estética.

En las raíces de las plantas, ocurre un fenómeno de atracción electrostática con las partículas coloidales suspendidas en el agua, de manera que se adhieren a la superficie de la raíz para ser absorbidas y asimiladas por las plantas y los microorganismos.

Además, las plantas transfieren oxígeno desde las hojas hasta la raíz, permitiendo la aireación en sus alrededores, favoreciendo la actividad de los microorganismos (Nuñez Lopez, Meas Vong , Ortega Borges, & Olguin, 2004).

1.2.9.3.3 Microorganismos

El papel principal de los microorganismos es degradar aeróbicamente (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno) la materia orgánica contaminante contenida en las aguas residuales, con lo cual la putrefacción en el biofiltro se reduce significativamente. (Thurmhofer, y otros, 2006).

1.2.9.4 Mecanismos de Remoción en un Biofiltro

Las macrófitas juegan un papel vital en el tratamiento. Además de muchos beneficios operacionales, proveen superficies y un ambiente razonable para la filtración y el crecimiento microbiano. La transferencia de oxígeno por algunas plantas acuáticas a la rizósfera es también un requisito para que los procesos de remoción de contaminantes predominantemente microbianos funcionen efectivamente. (Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005).

Los mecanismos de remoción más importantes se presentan en la siguiente tabla:

Tabla I-4. Mecanismos de Remoción en un Biofiltro

Constituyentes del agua residual	Mecanismo de remoción
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación. • Filtración.
Materia orgánica soluble Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Degradación microbiana aeróbica • Degradación microbiana anaeróbica. • Amonificación seguida por nitrificación microbiana y desnitrificación. • Consumo de las plantas. • Adsorción en el lecho filtrante. • Volatilización de amonio.
Fosforo Metales	<ul style="list-style-type: none"> • Fijación en el lecho filtrante. • Consumo de plantas. • Adsorción e intercambio de cationes. • Formación de complejos. • Precipitación.
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación/reducción microbiana. • Sedimentación. • Filtración. • Muerte natural. • Depredación. • Excreción de antibióticos desde las raíces de macrófitas.

Fuente: Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente CIEMA, 2005

1.2.9.5 Mecanismo de Remoción de Metales Pesados por Plantas y Sustrato

En general, se han propuesto varias vías para la entrada de metales pesados en las raíces de las plantas:

- **Primera Vía: Adsorción en la Membrana Celular**

En la membrana plasmática de las células epidérmicas de la raíz, el CO_2 se disocia en H^+ y HCO_3^- a través de la respiración de la planta. El H^+ se intercambia con los iones metálicos del medio, y el metal se adsorbe en la superficie de las células epidérmicas de la raíz. Este proceso es rápido, no requiere energía, y precede a la absorción de los iones metálicos en la epidermis a través de la vía del apoplasto (Song Y, Jin L, Wang X., 2017).

- **Segunda Vía: Uso de Transportadores de Metales Esenciales**

Algunos metales pesados, considerados elementos no esenciales, ingresan a las células vegetales a través de transportadores de metales esenciales como Fe^{2+} , Zn^{2+} y Ca^{2+} . Estos metales son transportados por proteínas como IRT1 y LCT1 y, después de combinarse con las proteínas transportadoras, entran en la capa de epidermis de la raíz a través de la vía del simplasto (Song Y, Jin L, Wang X., 2017).

- **Tercera Vía: Formación de Quelatos**

Las raíces secretan compuestos de baja masa molecular, como los ácidos mugineicos (MA), que forman complejos con varios iones metálicos. Estos complejos ingresan a la epidermis de la raíz a través de proteínas tipo YSL en forma de quelatos (Song Y, Jin L, Wang X., 2017).

1.2.9.5.1 Procesos de Remoción en el Biofiltro de Totorá

- **Adsorción:**

La Totorá, debido a su estructura porosa y composición química, puede adsorber metales pesados en su superficie. A medida que el agua fluye a través del biofiltro, los metales se adsorben en los sitios activos de la Totorá,

reduciendo su concentración en el agua tratada (Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I., 1995).

- **Intercambio Iónico:**

Los grupos funcionales en la superficie de la Totora pueden participar en el intercambio iónico con los iones de metales pesados en el agua, reteniendo los metales y disminuyendo su concentración (Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I., 1995).

- **Bioacumulación:**

Los microorganismos presentes en la Totora y en la biopelícula asociada pueden bioacumular metales pesados, absorbiéndolos y reteniéndolos en su interior, lo que ayuda a eliminar los metales del agua (Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., & Raskin, I., 1995).

1.2.9.5.2 Procesos de Remoción en el Sustrato

- **Adsorción-Desorción:**

El sustrato puede adsorber y desorber metales pesados, afectando su distribución entre las fases sólida y acuosa. Este proceso está influenciado por factores ambientales como el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

- **Precipitación-Disolución:**

Los metales pueden precipitarse o disolverse en el sustrato, afectando su solubilidad y biodisponibilidad. Este proceso es controlado por el pH, el potencial redox y la especiación química de los metales.

- **Complejación y Oxidación-Reducción:**

Los metales pueden formar complejos con compuestos orgánicos e inorgánicos en el sustrato, y sufrir reacciones de oxidación-reducción, afectando su reactividad y movilidad. (Adriano, 1986; Alloway, 1995; McBride, 1994; Sposito, 1989).

Estos mecanismos combinados hacen que las plantas como la Totorá y el sustrato en los sistemas de biofiltración sean eficaces en la remoción de metales pesados del agua, proporcionando una solución sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas.

1.2.10 Plantas Depuradoras para el Tratamiento de Aguas

A continuación, se describirán algunas de las plantas fitodepuradoras más usadas en los humedales además de la Totorá (*Thypha Domengensis*), tanto para humedales de flujo superficial como para flujo subsuperficial.

1.2.10.1 Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*)

Figura 1-7. Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*)



Fuente: Catálogo de la Biodiversidad, 2015

A esta macrófita comúnmente se le conoce como Jacinto de agua, es una especie de planta acuática flotante, que sus raíces son sumergidas. También es de libre flotación, y la altura de estas puede llegar entre 50 cm a 1 m. (Carhuaricra Ferrer, 2019).

- **Taxonomía**

El Jacinto de agua se encuentra en la siguiente clasificación taxonómica:

Tabla I-5. Clasificación Taxonómica del Jacinto de Agua (*Eichhornia Crassipes*)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Commelinales
Género	Eichhornia
Especie	Crassipes

Fuente: Garcia Campos & Parejas Quincho, 2021

- **Morfología**

Esta macrófita origina un rizoma ramificado que puede llegar a crecer hasta 30 cm con entrenudos cortos, cada uno de estos genera una hoja y una raíz. Tienen formación de ovoide que mide de 2 a 15 cm de largo y de 2 a 10 cm de ancho. Los bordes son curvados con venas finas y largas; “los peciolos son gruesos y esponjosos, hinchada en el medio y afilada hacia la estípula”. “Los tallos florales, que son pubescentes con dos brácteas y una estípula que produce entre 8 y 25 flores, cada flor posee 6 pétalos azulados con hasta 4 centímetros”. Las raíces del jacinto de agua son adventicias y fibrosas que llega a medir entre 10 y 30 cm (Carhuaricra Ferrer, 2019).

- **Reproducción**

Esta macrófita se reproduce vegetativamente y mediante semillas. Después de la floración, el pedúnculo se desvía y las cápsulas maduran y así las semillas se liberan bajo el agua. Las condiciones para la germinación es que sean aeróbicas y haya 48 temperaturas alternas; además los brotes axilares de las hojas más viejas de la plántula tienden a convertirse en estolones y crecen horizontalmente desarrollando plantas hijas (Carhuaricra Ferrer, 2019).

- **Hábitat**

Esta puede vivir en aguas dulces como ríos, pantanos, canales, entre otros. Esta planta se originó en la Amazonía. Además, a temperatura entre 20 y 30 °C, el Jacinto de agua tiene un crecimiento rápido a diferencia de una temperatura entre 8 y 15 °C, esto puede producir estancamiento (Coronel Castro, 2016) Entonces, en condiciones adecuadas esta macrófita es capaz de duplicar su población cada cinco días, e incluso una sola planta puede llegar a invadir por completo un lago (Carhuaricra Ferrer, 2019). Debido a la biomasa que se genera por esta macrófita, no dejan el paso de la luz hacia el interior del agua, por ello, no causa el crecimiento de algas.

1.2.10.2 Lechuga de Agua (*Pistia stratiotes*)

Figura 1-8. Lechuga de Agua (*Pistia stratiotes*)



Fuente: Catálogo de la Biodiversidad, 2015

A esta macrófita comúnmente se le conoce como Lechuga de agua, es una planta en forma de roseta y su propagación es rápida.

- **Taxonomía**

La Lechuga de agua se encuentra en la siguiente clasificación taxonómica:

Tabla I-6. Clasificación Taxonómica de la Lechuga de Agua (Pistia Stratiotes)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Airales
Género	Pistia
Especie	Stratiotes

Fuente: Garcia Campos & Parejas Quincho, 2021

- **Morfología**

Esta macrófita tiene las hojas en forma arrosetada (Cueva Placencia, 2016). “Sus hojas son de color verde claro con tejido esponjoso y grueso, presentan venas longitudinales; entre 7 y 15 nervaduras”. La forma que tiene esta planta es espatulada y erectas, llega hasta 12 cm de longitud (Chang Gutierrez & Huaman Taype, 2019). “Posee inflorescencia de flores masculinas y femenina de color crema” (Cueva Placencia, 2016). “La inflorescencia masculina tiene una sola flor con 2 estambres y las femeninas el ovario es elipsoide, con muchos óvulos”. “Los frutos son globosos que llegan a medir 1 cm de diámetro, están cubiertos por una envoltura delicada, además las semillas son de color blanco y rugosos” (Cueva Placencia, 2016). El tallo es corto y estolonífero; es decir, se generan brotes laterales dando lugar a individuos independientes. Las raíces son fasciculadas de un color claro, además es característico por ser plumoso y está enganchado a las rosetas. (Chang Gutierrez & Huaman Taype, 2019).

- **Reproducción**

Esta macrófita se reproduce sexual y asexualmente; además, por su reproducción vegetativa mediante estolones, se propaga muy rápido. Esto último hace que aparezcan más 50 macrófitas en los extremos y, debido a ello, una sola macrófita crea una pequeña colonia; sin embargo, los estolones de esta macrófita son frágiles, y con el movimiento del agua y el viento alcanzan a

invadir nuevos cuerpos de agua propagándose rápidamente (Chang Gutierrez & Huaman Taype, 2019). Las semillas que se generan de esta macrófita tardan entre 10 a 12 días en subir a la superficie y multiplicarse. (Cueva Placencia, 2016).

- **Hábitat**

Crece en países tropicales y subtropicales, estos habitan en lagos, pantanos, canales y cuerpos de agua con un caudal bajo. Se puede encontrar en toda la selva peruana en forma silvestre, también esta macrófita es usada en acuarios o estanques con mucha iluminación (Chang Gutierrez & Huaman Taype, 2019). Esta no soporta inviernos duros, para su crecimiento la temperatura adecuada esta entre 22 a 30 °C. (Cueva Placencia, 2016).

1.2.10.3 Lenteja de Agua (Lemma Minor)

Figura 1-9. Lenteja de Agua (Lemma Minor)



Fuente: Catálogo de la Biodiversidad, 2015

La Lemna minor o Lenteja de agua es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, es una planta acuática clasificada como una macroalga (macrófitas) de libre flotación que crece en aguas poco móviles, generalmente en agua dulce o humedales en la mayoría de las partes del mundo y, se caracteriza por su tamaño pequeño y gran capacidad reproductiva lo que le permite ocupar grandes espacios acuáticos en muy poco tiempo. (Tache Rocha, 2020).

- **Taxonomía**

La lenteja de agua se encuentra en la siguiente clasificación taxonómica:

Tabla I-7. Clasificación Taxonómica de la Lenteja de Agua (Lemma Minor)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Alismatales
Género	Lemma
Especie	Lemma minor

Fuente: Tache Rocha, 2020

- **Morfología**

Lemna minor es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, perteneciente a la familia Lemnaceae. Su cuerpo vegetativo corresponde a una forma taloide, es decir, en la que no se diferencian el tallo y las hojas. Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco. Según algunos autores el tallo ha sido interpretado de diversas maneras: un tallo modificado, una hoja o como parcialmente tallo y hoja. Otros autores consideran que el tallo corresponde a una hoja modificada que cumple las funciones del tallo, la hoja y el eje florífero. (Gallach, 1984).

Su tamaño es muy reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. Es una de las especies de angiospermas más pequeñas que existen en el reino de las plantas. En la misma familia de la lenteja de agua se encuentra *Wolffia*, reportada como la planta con flores de tamaño más reducido que existe en la Tierra; su cuerpo mide sólo 0,6 mm de largo y 0,2 mm de ancho, y su fruto, que es el más pequeño del planeta, mide sólo 0,3 mm de largo y pesa 70 mg. (Arroyave, 2004).

- **Reproducción**

La Lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. El periantio está ausente. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata, muy común en las especies del orden arales. El fruto contiene de 1 a 4 semillas. (Gallach, 1984).

La forma más común de reproducción es la asexual por gemación. En los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que origina una planta nueva que se separa de la planta progenitora. (Gallach, 1984). Sin embargo, es común encontrar las plantas agregadas formando grupos de 2 a 4 individuos.

- **Hábitat**

La planta puede desarrollarse en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° y 30°C, con un crecimiento óptimo entre los 15° y 18°C. Se adapta bien a cualquier condición de iluminación. Crece rápidamente en partes calmadas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y fosfatos. Con frecuencia el hierro es un elemento limitante para su adecuado desarrollo. Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5. (Arroyave, 2004).

1.2.10.4 Totorá (*Scirpus californicus*)

Esta macrófita, forma parte de la amplia gama de plantas fitodepuradoras empleadas en los sistemas no convencionales de depuración de aguas residuales.

Las helófitas son plantas adaptadas a condiciones de saturación de humedad e inundación, siempre que el agua no las cubra completamente. Es decir, soportan una fuerte limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Comprenden una parte debajo del nivel del agua, y otra parte aérea. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade, 2010)

Figura 1-10. Totora (*Scirpus californicus*)



Fuente: Vanderhoff, 2013

- **Taxonomía**

La Totora (*Scirpus Californicus*) se encuentra en la siguiente clasificación taxonómica:

Tabla I-8. Clasificación taxonómica de la Totora (*Scirpus Californicus*)

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Cyperales
Género	Scirpus
Especie	<i>Scirpus Californicus tator</i>

Fuente: Navas, 2001

- **Morfología**

La Totora, hierba perenne, acuática, fasciculada y de escaso porte, podría llegar a medir hasta 4 m de altura, siendo que por lo menos la mitad se encuentra

sumergida en el agua y la otra parte es observada por encima de la superficie. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade , 2010).

Poseen epidermis demasiadas delgadas con el objetivo de reducir la resistencia ofrecida al paso de agua, gases, y nutrientes. Como consecuencia se forman grandes espacios intercelulares con conductos huecos de red en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esto deja transferir el oxígeno desde el aire hacia los órganos fotosintéticos, y desde aquí para las raíces. (Fernández Gonzáles, Beascochea, Muñoz, & Curt Fernandez, 2001).

Las raíces de la Totora tienen características fibrosas y adventicias que no logran desarrollar pelos radicales, pero que el diámetro del tallo subterráneo(rizomas) de cada raíz varía en relación con su edad. También basado a su edad puede presentar nudos distanciados entre 2 cm a 6 cm, el cual da origen a un nuevo rebrote que forma el tallo aéreo.

Su tallo es liso, flexible, erecto, rollizo, similar al césped, muy liviano y sin tuberosidades en la base.

Sus hojas tienden a formar una vaina que aborda en la base del tallo. Se distribuyen en dos sectores: las hojas de la parte inferior y de la parte superior. Las flores son pequeñas y hermafroditas, es decir, hay una conjunción en sí los dos sexos. Se encuentra envuelta por flores compuesta por 2 a 6 escamas. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade , 2010).

- **Reproducción**

En la mayoría de los casos, la Totora se reproduce vegetativamente. La reproducción por semillas es muy limitada debido a que generalmente no logran germinar. La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos; o sea, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al medio ambiente. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade , 2010).

- **Hábitat**

Son plantas de climas templados que prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pH (4 - 9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo de 16 °C a 27 °C. Prospera muy bien en medios acuáticos de profundidad somera como lagunas o zonas de inundación. (Delgadillo, Camacho, Perez, & Andrade , 2010)

1.2.10.5 Totora (*Typha Domingensis*)

Figura 1-11. Totora (*Typha Domingensis*)



Fuente: Catálogo de la Biodiversidad,2015

El género *Typha*, es un género de plantas monocotiledóneas perennes que pertenecen a la familia de las Typhaceae. Existen casi 82 especies e híbridos de *Typha* (Catalogue of Life, 2017) y de ellas, las más ampliamente distribuidas son: *latifolia* L., *T. angustifolia* L. y *T. domingensis* Pers. Las diferentes especies de *Typha* reciben distintos nombres comunes, así en Argentina y Uruguay se conoce como Totorá; en Brasil, Toboa; en República Dominicana, Venezuela y Colombia, Enea; en España, Espadaña o Enea; en Australia, Cumbungi; en Norteamérica, Cattail; en Francia, Masette, en Indonesia, Purun y en Japón Gama, entre otros. (CABI, 2008).

- **Taxonomía**

La Totorá (*Typha Domingensis*) se encuentra en la siguiente clasificación taxonómica:

Tabla I-9. Clasificación Taxonómica de la Totorá (*Typha Domingensis*)

Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheomorphytae
Subdivisión	Anthomorphyta
Clase	Angiospermae
Sub clase	Monocotyledonae
Familia	Typhaceae
Orden	Pandanales

Fuente: Herbario Regional ,2023

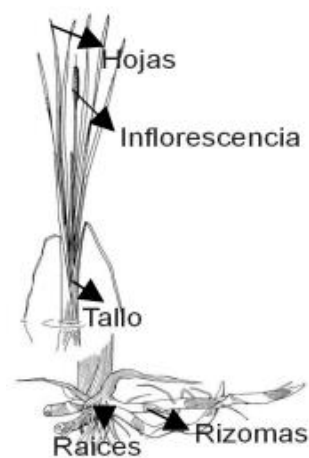
- **Morfología**

Las plantas del género *Typha* son herbáceas acuáticas emergentes y rizomatosas que poseen hojas verdes extremadamente largas, inflorescencias de tipo espiga compuesta y sistema de rizomas horizontales y subterráneos interconectados. Su estructura vegetativa emerge por encima de la lámina del agua y constituye su biomasa aérea, mientras que su sistema radicular arraigado en el fondo del humedal junto con los rizomas (tallos subterráneos o hipógeos) constituye la biomasa sumergida. Los tallos son erectos, simples y cilíndricos, presenta hojas alternas, ensiformes, lineares y envainantes. La cara interna de la vaina es lisa o está cubierta de glándulas mucilaginosas y se atenúa paulatinamente hacia el limbo o presenta 2 aurículas terminales, la lámina es convexa por el envés. (Carhuncho León, 2021).

Es una especie monoica que presenta una inflorescencia terminal en espiga formada por dos partes muy densas, con una o más brácteas foliáceas caedizas

que pueden estar separadas o en contacto entre ellas. Las flores masculinas se sitúan en la parte superior de la inflorescencia mientras que las femeninas se sitúan en la inferior. (Carhuncho León, 2021).

Figura 1-12. Morfología de la Totorá (*Typha Domingensis*)



Fuente: Reyes, 2001

- **Reproducción**

El género *Typha* posee una gran capacidad para colonizar rápidamente nuevos hábitats acuáticos formando masas densas (monoespecíficas) a causa de la fácil dispersión de sus semillas, alto ratio de crecimiento y propagación mediante rizomas. Estas características unidas a su adaptabilidad a los cambios ambientales hacen que este género se considere en algunas ocasiones como planta invasora en las zonas húmedas donde se desarrolla. (Carhuncho León, 2021).

- **Hábitat**

El género *Typha* está ampliamente distribuido por todo el mundo, en hábitats con inundaciones moderadas y profundas como son humedales, marismas y otros hábitats acuáticos de climas tropicales, subtropicales y templados de los hemisferios norte y sur; también aparece en zonas costeras. (CABI, 2008). Su amplia distribución se debe a la gran capacidad de adaptación de este género a las variables húmedas y en zonas continentales secas y de clima mediterráneo

Aunque son plantas de humedales y prefieren el agua dulce, el género *Typha* tolera la sequía siempre que los suelos tengan una humedad mínima de 5%, también tolera cierto grado de salinidad y acidez (Baldwin & Cannon, 2007) y las aguas contaminadas con metales pesados como Plomo, Zinc, Cobre y Níquel. (Carhuncho León, 2021).

1.2.11 Trabajos Realizados por Otros Autores

En la realización del presente estudio se toman en cuenta estudios realizados en anteriores proyectos.

- **Tratamiento de aguas residuales utilizando plantas acuáticas (Duran, 2000)**

Donde se determinó la capacidad depuradora de plantas acuáticas seleccionadas en el valle de Tarija y en sistemas de experimentación de carga discontinua Batch, para condiciones climáticas de Tarija.

Se realizó un estudio en Batch utilizando tres especies: Jacinto de agua, Azolla y Totorá, en el cual se concluyó que el sistema que contenía Totorá (*Typha Domingensis*) fue el que alcanzó mejores resultados; brindó una alta depuración de contaminantes; además esta planta soporta temperaturas bajas y elevadas que se presentan en la ciudad de Tarija entre el invierno y verano. Los humedales de flujo subsuperficial tienen varias ventajas sobre los de flujo superficial. Como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, la misma no está expuesta, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos que puedan llegar a presentarse en sistemas de flujo libre en algunos lugares. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, así como se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica. (Duran, 2000).

- **Tratamiento de aguas residuales domiciliarias con Totorá (*Typha Domingensis*) en humedales artificiales de flujo continuo (Sullca, 2004)**

Donde se diseñó un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias a flujo continuo en humedales artificiales de flujo subsuperficial.

En este estudio se observó que las plantas crecen a un ritmo acelerado por la inmediata disposición de alimento que tienen. La biomasa generada es más abundante en el sistema con deflectores debido a que la materia orgánica disponible como alimento para las plantas es mejor aprovechado produciéndose así un mayor rendimiento en la depuración de los parámetros estudiados. (Sullca, 2004).

En este estudio, se recomienda realizar una investigación utilizando un sistema similar al estudiado, ya que, según bibliografía, la Tatora (*Typha Domingensis*) es una planta eficaz en la remoción de metales pesados de aguas contaminadas.

- **Evaluación de la calidad del agua y clasificación de afluentes que tributan a la represa Huacata en el municipio de San Lorenzo (Llanos,2021)**

En este estudio se evaluaron las fuentes hídricas que tributan a la represa Huacata, utilizando las normas: NB 512 (2018), FAO (2002) y el RMCH (1992), lo cual se usó para medir la calidad hídrica y luego establecer la aptitud de uso de estas fuentes. El estudio se lo hizo a través de 4 campañas de monitoreo de calidad hídrica, dos en época húmeda y dos en época seca.

La calidad del agua fue establecida por las características de las fuentes hídricas analizadas en laboratorio y en campo, que se tradujeron en niveles de metales pesados, plaguicidas, orgánicos, inorgánicos y bacteriológicos, los mismos fueron interpretados mediante variaciones espacio tiempo. Luego se asignó clases a las fuentes según RMCH (1992), correspondiendo cada clase a la aptitud de uso de la fuente.

Las evaluaciones mostraron que la quebrada "La Mina", se encuentra en estado crítico en época húmeda y seca debido a niveles elevados de Plomo, Cadmio y Zinc según RMCH (1992), por lo que no es apta para consumo humano ni riego. La quebrada El Valle es clase B en época húmeda y en época seca es clase D. Las fuentes restantes incluido el embalse corresponden a la clase "C" según RMCH (1992) en ambas épocas hidrológicas, aptas para riego y no aptas para consumo humano sin previo tratamiento físico, químico y bacteriológico; según NB 512 (2018) no son aptas para consumo humano por elevados niveles de

nitritos, turbiedad y colifecales, mientras que FAO (2002) indica que las mismas son aptas para riego, ya que no existe riesgo de salinidad y sodicidad para suelos ni toxicidad para plantas. (Llanos, 2021).

Se recomienda implementar medidas de mitigación ambiental para la quebrada La Mina, ya que en un futuro podría verse afectadas otras fuentes hídricas aguas abajo y, por otro lado, podría verse afectada la disponibilidad de agua de la represa.

CAPITULO II
PARTE EXPERIMENTAL

Introducción

El presente trabajo describe la aplicación de un método de tratamiento por biofiltración a escala laboratorio, para las aguas del efluente de la Mina Perales ubicada en la zona de Huacata, las que presentan niveles de metales pesados: Plomo, Cadmio y Zinc, que sobrepasan los límites permisibles según el RMCH.

Esta investigación muestra una alternativa de operación simple y económica que está orientada a solucionar los problemas causados por las infiltraciones de aguas de las minas cuyos efluentes arrastran los metales hacia la quebrada, en forma tal que estas aguas al llegar a fuentes hídricas más grandes que son usadas para el riego, no lleven consigo rastros de metales que puedan afectar la aptitud de uso de estas.

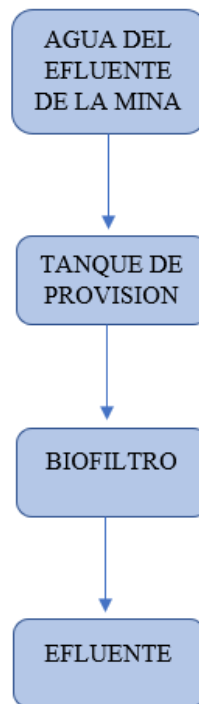
El modelo que se ha planteado se definió de acuerdo a experiencias similares previas locales realizadas por Duran en el 2000, Sullca en el 2004, Cari en el 2012, entre otros.

Dicho modelo es el modelo de Flujo Sub-Superficial con plantas emergentes, el cual tiene la ventaja de que el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, la cual al no estar expuesta directamente al ambiente no está expuesta a las temperaturas atmosféricas, ofreciendo así una protección térmica a muy bajas temperaturas que se puedan dar; además con este modelo se evitan posibles problemas de mosquitos y otros vectores que pueden llegar a presentarse en sistemas de flujo libre.

Este modelo funciona como un reactor Batch con un flujo de entrada horizontal, sobre la base de que las aguas fluyen reaccionando o degradando la materia en la medida que atraviesan el biofiltro desde la zona de distribución en la entrada del sistema, siguiendo una trayectoria serpenteante de forma horizontal a través del lecho filtrante, hasta que llegan a la zona de salida o recolección del efluente.

Adelante se muestra en la figura el diagrama de flujo del sistema experimental propuesto para mostrar una mejor percepción.

Figura 2-1. Diagrama de Flujo del Proceso de Tratamiento



Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 2-2. Sistema de Biofiltración



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.1 Descripción del Equipamiento Experimental

La estructura del biofiltro utilizada para este trabajo es la que se encuentra disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Química. La estructura fue diseñada y construida por la Ingeniera Ingrid Patricia Mollo Vidaurre en el año 2018 para realizar su Trabajo de Grado.

2.1.1 Tanque de Provisión

El tanque de provisión tiene múltiples funciones, de las cuales se pueden mencionar:

- Almacenar el agua a ser tratada.
- Alimentar el agua a ser tratada al biofiltro.
- Separar partículas sólidas suspendidas que se puedan presentar en el agua con el fin de evitar taponamientos en las válvulas posteriores dentro del sistema a escala laboratorio.

2.1.2 Biofiltro

Un biofiltro consiste en un medio filtrante (como grava, arena) combinado con plantas acuáticas o macrófitas, que colaboran en la degradación, transformación, o adsorción de los contaminantes presentes en el agua.

El biofiltro utilizado en este trabajo consta de un medio granular, a través de los cuales circula el agua que no aflora a la superficie y una planta macrófita que tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de metales pesados y acumularlos en sus tejidos. (Aduvire & Cahuna, 2019).

En estos sistemas, el agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra, circula en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno. Al final y en el fondo de lecho, el agua tratada se recoge y se evacua por medio de tuberías o vertederos. La profundidad de un humedal descrito en experiencias anteriores, para garantizar un proceso aerobio, no excede los 0,50 m y para facilitar la circulación del agua tiene una leve pendiente del 2% en el fondo del Biofiltro.

Las dimensiones y características del Biofiltro a escala laboratorio, diseñado y construido para el tratamiento de aguas residuales, se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla II-1. Dimensiones del Biofiltro

Parámetro	Símbolo	Medida
Largo del Biofiltro	lt	1m
Ancho del Biofiltro	at	0,5m
Altura total del Biofiltro	h	0,5m
Espaciado entre deflectores	a1	0,15m
Largo de los deflectores	a2	0,375m
Numero de deflectores	N	7

Fuente: Ingrid Mollo, 2018

2.1.2.1 Lecho filtrante

El lecho filtrante es una de las partes más importantes del biofiltro, este proporciona una superficie sólida y porosa que favorece la adsorción y adhesión de los metales pesados, además de servir como sustrato y sostén para las plantas.

El sustrato debe ser lo suficientemente estable y duradero para resistir las condiciones del medio ambiente y el flujo constante de agua. La estabilidad del sustrato es crucial para mantener la integridad del biofiltro a lo largo del tiempo y garantizar un tratamiento efectivo.

El lecho filtrante del biofiltro cuenta con dos tipos de sustratos, grava y arena. La grava seleccionada es de 7/8 pulg, esto debido a que la misma ha sido optimizada en el trabajo realizado por Rodrigo Úzqueda en el 2002. La grava es recolectada de una chancadora.

Se selecciona un suelo arenoso, ya que es un medio muy favorable para el crecimiento de la Totorá, además de ser el predominante en la zona de estudio.

La arena utilizada es recolectada a orillas de la quebrada de Colon Sud, a esta arena se le realizó un estudio para poder conocer exactamente su composición, este análisis fue realizado por el Laboratorio de Suelos de la UAJMS.

Tabla II-2. Textura del Sustrato

Parámetro	Resultado	Clasificación	Método
Clase Textural	82,60% Arena	Arena Franca	ASTMD422
	11,00% Limo		
	6,40% Arcilla		

Fuente: Laboratorio de Suelos UAJMS, 2023

2.1.2.2 Totorá

Las macrófitas, juegan un papel crucial en los biofiltros utilizados para el tratamiento de aguas contaminadas, esto debido a que absorben y acumulan diversos contaminantes, incluyendo metales pesados, nutrientes excesivos (nitrógeno y fósforo), y compuestos orgánicos. Esto se logra a través de sus raíces, tallos y hojas, reduciendo la concentración de estos contaminantes en el agua tratada. Además, contribuyen a la mejora general de la calidad del agua mediante la oxigenación del entorno acuático, que favorece la proliferación de microorganismos aerobios que descomponen materia orgánica y otros contaminantes. (Martelo & Borrero, 2012).

La macrófita emergente correspondiente para el biofiltro de flujo subsuperficial, es la Totorá (*Typha Domingensis*) tomando en cuenta que según bibliografía y otros estudios, ésta planta se considera eficaz para el tratamiento de aguas contaminadas con

metales pesados debido a su capacidad de absorción y acumulación, resistencia a ambientes contaminados, mecanismos de tolerancia, facilidad de cultivo y manejo, versatilidad en diferentes condiciones ambientales, y efectividad en procesos de fitorremediación.

Además de ser una planta que se encuentra en nuestro entorno estando adaptada a los factores climáticos del departamento de Tarija. (Duran, 2000).

La Totora es traída desde Entre Ríos, a la cual se realizó su taxonomía en el Herbario Regional de la UAJMS. (Anexo 2).

Tabla II-3. Taxonomía de la Totora

Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheophytae
Subdivisión	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sub clase	Monocotyledonae
Familia	Typhaceae
Orden	Pandanales

Fuente: Herbario Regional UAJMS, 2023

2.2 Diagnóstico del Efluente de la Mina Perales

De acuerdo a la información a la que se puede acceder a través del Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA) la problemática del efluente de la Mina Perales es una contaminación debido a metales pesados que se encuentran

en estas aguas, los cuales no cumplen con los niveles que permite la Ley 1333 en su Reglamento del Materia de Contaminación Hídrica.

Los metales pesados que se encuentran sobre los límites permisibles en este efluente son Plomo, Cadmio y Zinc.

Es por esta razón que estos tres tipos de metales pesados son los estudiados en este trabajo.

Para la época seca del año 2019 en el punto donde se tiene mayor contaminación se tienen datos de laboratorio donde se tienen concentraciones máximas de Plomo de 0,91mg/l, Cadmio de 0,056 mg/l y Zinc de 42,65mg/l. De acuerdo con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica para la clase A los niveles de Plomo deben ser de 0,05mg/l, de Cadmio de 0,005mg/l y de Zinc 0,2mg/l. (SEDEGIA, 2019).

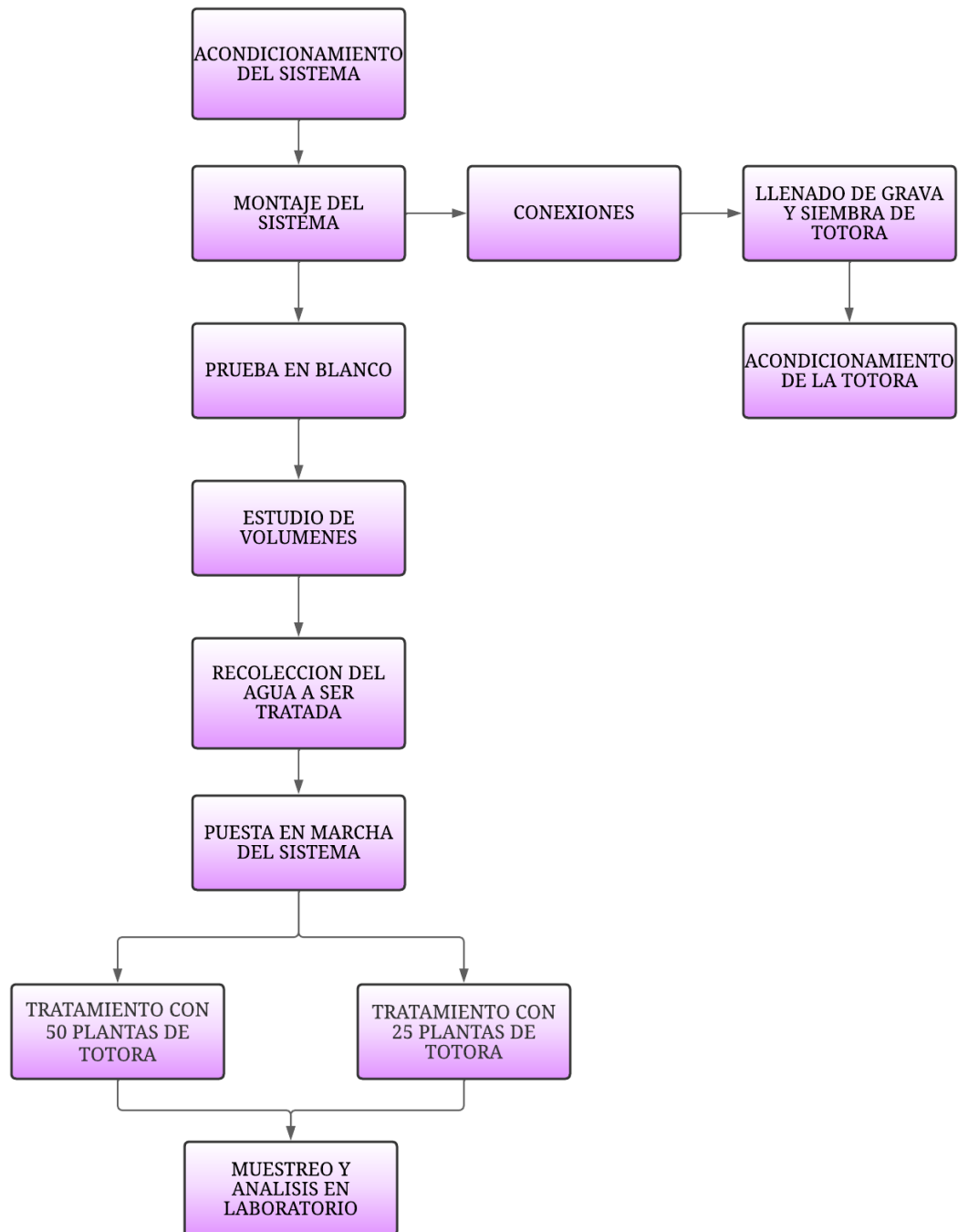
Figura 2-3. Efluente de la Mina Perales



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.3 Metodología de la Investigación

Figura 2-4. Metodología Experimental



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.3.1 Acondicionamiento del Sistema de Biofiltración

Para iniciar la parte experimental, primero se revisan los materiales y equipos necesarios para armar el sistema de biofiltración.

El armazón del biofiltro, ubicado en las instalaciones del LOU, se encontraba en buen estado y solo requirió una limpieza adecuada. Se necesita un tanque de provisión para el agua a ser tratada, que también está en las instalaciones del LOU, el mismo es limpiado de igual manera.

Para las conexiones, se utilizan dos válvulas nuevas, ya que las disponibles en el LOU no estaban en buen estado. También se emplean mangueras, tuberías y cinta de teflón para asegurar las conexiones adecuadas del sistema.

Figura 2-5. Armazón del Biofiltro



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.3.2 Montaje del Sistema de Biofiltración

Para armar el sistema, se eligió la terraza del LOU como ubicación adecuada, debido a que el biofiltro tiene plantas de Totorá que requieren luz solar para realizar la fotosíntesis.

Se construyó un invernadero en la terraza para proteger el sistema de las lluvias y vientos fuertes. Este invernadero consiste en un armazón de madera cubierto con calaminas en el techo y plástico en tres paredes, dejando una pared delantera y una

parte de la pared trasera libre para permitir la circulación de aire sin bloquear la luz solar.

Una vez construido el invernadero, se procede con el armado del sistema de biofiltración.

Se coloca el tanque de provisión sobre una mesa para darle altura y, a continuación, se posiciona el biofiltro, se realizan todas las conexiones necesarias y se lleva a cabo una prueba en blanco del sistema, sin la grava y las plantas de Totorá, para verificar que no haya fugas y que las conexiones estuvieran correctas.

Para el armado del biofiltro, se comienza colocando una capa de grava gruesa de aproximadamente 5 cm de altura, seguida de una capa de arena de unos 30 cm, y finalmente otra capa de grava gruesa de 5 cm, formando un sustrato total de 40 cm de altura. En cada fila del biofiltro se plantan tres plantas de Totorá, sumando un total de 21 plantas en un área de 0,5 m².

Después de montar todo, se realiza otra prueba en blanco, en donde se deja entrar un volumen de agua en el biofiltro para verificar el correcto funcionamiento del sistema, y además determinar el volumen útil del biofiltro, es decir, el volumen en el que el agua no sobrepasa el sustrato, simulando un sistema de flujo sub-superficial. El volumen útil del biofiltro resulta ser de 50 litros.

2.3.3 Tiempo de Acondicionamiento de las Totorá

Cuando las plantas se trasplantan a un nuevo lugar, tienden a marchitarse o secarse. Por lo tanto, se debe esperar un tiempo de acondicionamiento para que las plantas puedan adaptarse, volver a crecer y fortalecerse. La Totorá fue inicialmente plantadas con una altura de entre 30 y 40 cm, y se les da aproximadamente un mes para establecerse. Durante este tiempo, se riegan continuamente para fomentar su crecimiento.

Debido a su capacidad de reproducción a través de rizomas, las plantas se reproducen rápidamente, alcanzando una cantidad de 50 plantines y una altura de 1,50 m para la primera etapa de la fase experimental.

Figura 2-6. Adecuación de la Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

2.3.4 Recolección del Agua del Efluente de la Mina Perales

Se realizó el muestreo trasladándose al punto donde se encuentra la bocamina Perales en Huacata. El tiempo empleado fue de aproximadamente 2 horas hasta llegar al sitio. La recolección del agua se llevó a cabo en dos ocasiones, recogiendo aproximadamente 200 litros de agua en cada ocasión, y empleando alrededor de 1 hora para esta tarea.

En ambas ocasiones, la toma de muestras se efectúa en el mismo punto, directamente del efluente de la mina Perales. Para esto, se utilizan varios bidones de plástico, los que son previamente enjuagados con el agua del lugar antes de ser llenados completamente y transportados al LOU.

Se toma una muestra de 3 litros para llevarla directamente al laboratorio CEANID para su análisis inicial. Se registran los datos del momento de la toma de muestra y se toman las fotografías correspondientes. (Anexo 7).

Dado que los contaminantes son metales pesados, a diferencia de los contaminantes orgánicos, no se degradan mediante descomposición química o biológica tradicional, sino que tienden a permanecer en el medio durante largos períodos.

2.3.5 Funcionamiento del Sistema de Biofiltración

2.3.5.1 Variables de estudio

Las variables de estudio planteadas para este proyecto son la cantidad de plantas y los tiempos de retención.

Para una primera parte experimental se tienen 50 plantas de Totorá con tiempos de retención de 12hr, 24hr y 36hr.

Para una segunda parte experimental se tienen 25 plantas de Totorá con tiempos de retención de 12hr, 24hr y 36hr.

2.3.5.2 Puesta en Marcha del Biofiltro

Una vez que las plantas de Totorá se acondicionaron a su nuevo hábitat se comienza con la parte experimental.

En las primeras ocasiones se tenía pensado realizar el tratamiento durante varios días, con tiempos de retención de 24hr durante 5 días. Sin embargo, debido a las altas temperaturas la evapotranspiración de las plantas es alta. Por esta razón cuando se echan por primera vez 50 litros de agua a tratar en el tanque de provisión, que posteriormente entra al biofiltro para comenzar el tratamiento, al querer tomar muestras a las 48 hr, ya no sale agua del biofiltro.

2.3.5.3 Estudio de Volúmenes

Se define que los tiempos de retención son de 12, 24 y 36 horas. Para esto, previamente se realiza un estudio de volúmenes para asegurarse de que hubiera disponibilidad de agua a la salida del biofiltro después de estos tiempos.

Seguidamente, se espera hasta que las temperaturas se regulen y no estén demasiado altas. Posteriormente, se realiza el siguiente estudio con agua normal:

- Se colocan 50 litros de agua en el sistema y se esperan 12 horas para recolectar el total de agua a la salida del biofiltro.
- Se colocan 50 litros de agua en el sistema y se esperan 24 horas para recolectar el total de agua a la salida del biofiltro.
- Se colocan 50 litros de agua en el sistema y se esperan 36 horas para recolectar el total de agua a la salida del biofiltro.

Esta metodología se aplica tanto para la primera parte experimental con 50 plantas de Totorá como para segunda parte experimental con las 25 plantas de Totorá.

Este estudio se realiza no solo para verificar si existe suficiente agua para tomar muestras después de los tiempos de retención establecidos, sino también para obtener datos de volúmenes que son utilizados posteriormente en los cálculos necesarios para el balance de materia.

2.3.5.4 Tratamiento con 50 Plantas de Totorá

Una vez completados los estudios previos para asegurar la viabilidad del estudio de tratamiento, se inició la primera parte experimental con las 50 plantas de Totorá y los tres tiempos de retención establecidos (12 horas, 24 horas y 36 horas), con dos réplicas.

En ambas réplicas, se introducen 50 litros de agua a ser tratada en el sistema de biofiltración, asegurándose de que ingrese de manera constante y sin turbulencias para garantizar un Flujo Sub-Superficial.

El tiempo que el agua tarda en entrar al biofiltro es de aproximadamente 2 horas. Posteriormente, se toman muestras de agua tratada a la salida del biofiltro a las 12 horas, 24 horas y 36 horas respectivamente.

Al finalizar las 36 horas, se recoge el agua restante en el biofiltro para determinar su volumen total.

2.3.5.5 Tratamiento con 25 Plantas de Totorá

Una vez completadas las dos réplicas con las 50 plantas, se lleva a cabo la segunda parte del experimento utilizando 25 plantas de Totorá. Para ello, se retiran 25 plantas del biofiltro, dejando únicamente las necesarias para el estudio.

El procedimiento para esta segunda parte es similar al utilizado con las 50 plantas. En ambas réplicas, se introducen 50 litros de agua a ser tratada en el sistema de biofiltración, asegurando un ingreso constante y sin turbulencias para mantener un Flujo Sub-Superficial. El tiempo que el agua tarda en ingresar al biofiltro es de aproximadamente 2 horas.

Posteriormente, se toman muestras de agua tratada a la salida del biofiltro a las 12 horas, 24 horas y 36 horas respectivamente. Al finalizar las 36 horas, se recoge el agua restante en el biofiltro para determinar su volumen total, siguiendo el mismo protocolo establecido en la primera parte del experimento con las 50 plantas de Totorá.

2.3.5.6 Toma de Muestras

- **Toma de muestras del agua**

En la ejecución del presente proyecto se optó por el uso de la siguiente técnica:

- **Muestro Simple:** La muestra simple es solo una muestra tomada en un instante. Es muy fácil de hacerla, ya que solamente se toma con un recipiente el agua de la tubería o de una caída. Además, es rápido de tomarla. Tiene desventajas que solo indica la composición del agua en el instante en que fue tomada, además los errores durante el muestreo no son relativos. (MMAYA, 2015).
Se utiliza la muestra simple si el agua no presenta alteraciones y cuando no hay tiempo para tomar una muestra compuesta. Este último sucede, por ejemplo, si hay una descarga no usual y extraña que es temporal y de golpe, causada por una descarga industrial. En una situación así no hay tiempo para sacar una muestra compuesta. (MMAYA, 2015).

El muestreo simple se emplea durante la ejecución del proyecto en las muestras tomadas a salida del Biofiltro, esto debido a que el proceso de muestreo no es

complicado y se toma directamente desde el grifo que se encuentra a la salida del Biofiltro. Además, las muestras tanto en entrada y salida deben ser tomadas a la misma hora.

Las muestras se recolectan cada 12 horas durante tres ocasiones: a las 12 horas, 24 horas y 36 horas después de que el agua ingresa al biofiltro.

Para llevar a cabo el muestreo, se prepararon botellas de plástico de 3 litros previamente lavadas. Se recoge el agua en una jarrita de un litro y luego se vierte en las botellas.

Todos los recipientes utilizados en el muestreo fueron enjuagados previamente con agua tratada para evitar la contaminación de las muestras. Una vez llenadas, las botellas se etiquetaron correctamente. (MMA YA, 2015).

Este procedimiento se repite en todas las ocasiones en las que se toma muestras durante el experimento para garantizar la consistencia y fiabilidad de los datos recopilados.

Figura 2-7. Muestras Recolectadas del Efluente del Biofiltro



Fuente: Elaboración propia, 2024

- **Toma de muestras de la Totora**

Se toma una muestra de una planta completa de Totora es decir de la hoja, rizoma y raíz.

- **Toma de muestras del sustrato**

Se toma una muestra de sustrato.

2.3.5.7 Análisis de Laboratorio

- **Análisis de agua**

La primera muestra que se toma es directamente del efluente de la Mina Perales, con el propósito de caracterizar el agua en su estado inicial antes de cualquier tratamiento.

Las muestras subsiguientes, recolectadas a lo largo de todo el proceso de tratamiento a la salida del biofiltro, fueron transportadas al laboratorio del CEANID para su análisis y caracterización en cuanto a Plomo, Cadmio y Zinc.

Los resultados de los análisis de laboratorio están disponibles aproximadamente después de 10 días de haber entregado las muestras.

- **Análisis de cenizas en la Totora**

Las muestras de Totora fueron enviadas al laboratorio Spectrolab de Oruro con el propósito de realizar el análisis de cenizas, específicamente para determinar la concentración de Plomo, Cadmio y Zinc presentes en la planta. Este análisis permite conocer la cantidad de estos metales que la Totora ha absorbido durante su exposición al agua contaminada. Asimismo, se envía una muestra de Totora en blanco.

- **Análisis de Sustrato**

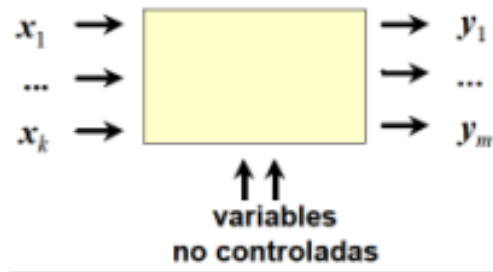
La muestra de sustrato también es enviada al laboratorio Spectrolab de Oruro con el fin de determinar la concentración de Plomo, Cadmio y Zinc presentes en el sustrato. Este análisis permite evaluar la cantidad de metales pesados que permanecen en el sustrato después del tratamiento. Asimismo, se envía una muestra de sustrato en blanco.

2.4 Diseño Experimental

Las situaciones en las que se puede aplicar el Diseño Experimental son muy numerosas. De forma general, se aplica a sistemas como el mostrado en la Figura 2-8, en los cuales se observan una o más variables experimentales dependientes y llamadas respuestas cuyo valor depende de los valores de una o más variables independientes x controlables llamadas factores. Las respuestas además pueden estar influidas por otras

variables que no son controlables por el experimentador. La relación entre x e y no tiene porqué ser conocida. (Montgomery, 2012).

Figura 2-8. Sistema de Diseño Factorial



Representación de un sistema en estudio de diseño experimental: factores x , respuestas y .

Para el caso del sistema experimental tenemos: Un sistema de tratamiento para la disminución de metales pesados en las aguas del efluente de la Mina Perales, cuya cantidad de plantas x_1 y tiempo de retención x_2 pueden condicionar otras variables, como concentración de Plomo y_1 .

2.4.1 Elección del Diseño Experimental

Es frecuente realizar la experimentación en diversas etapas secuencialmente. En cada etapa, las series de experimentos se agrupan en diseños denominados matrices de experimentos. La selección de una matriz u otra depende del objetivo de cada etapa, y de otras características. A continuación, se identifican distintos objetivos y del tipo de diseño que se pueden aplicar a este caso. (Ferre & Rius, 2002).

2.4.1.1 Estudio de los Factores

Una vez identificado los factores más importantes, el siguiente paso es el estudiar cuantitativamente su efecto sobre la respuesta y sus interacciones. Para este propósito se pueden utilizar los diseños factoriales completos a dos niveles 2^k . (Ferre & Rius, 2002).

Un objetivo de la investigación suele ser la optimización de una o varias respuestas en un producto o proceso. Es decir, conocer qué valores de los factores proporcionan respuestas (cantidad de plantas, tiempo de retención, etc.) con la calidad deseada. Estos se pueden conocer calculando un modelo matemático que relaciona los factores más relevantes x con las respuestas y .

2.4.2 Pasos para realizar el Diseño Factorial

El diseño factorial comprende los siguientes pasos:

- Elección de las variables objeto de estudio.
- Elección de las respuestas a medir.
- Elección del intervalo de valores para dichas variables.
- Planificación de experimentos.
- Realización de experimentos y recolección de datos.
- Análisis de los datos experimentales. (Ferre & Rius, 2002).

2.4.2.1 Elección de las Variables a Medir: Respuestas

La variable respuesta más adecuada a medir es el rendimiento en la remoción de Plomo, expresada en %.

2.4.2.2 Elección de las Variables de Operación: Factores

Las variables identificadas y seleccionadas para este proceso son las siguientes:

- Cantidad de plantas.
- Tiempo de retención.

2.4.2.3 Elección de los intervalos de operación para cada una de las variables de operación: niveles

Según las variables que influyen en el proceso son la cantidad de plantas, tiempo de retención. Se toma los intervalos de operación más convenientes, los mismos que son seleccionados teniendo en cuenta los datos recopilados.

Los intervalos de operación propuestos son los que se muestran a continuación:

- **Cantidad de plantas**

De acuerdo al diseño experimental la cantidad de plantas es una de las variables independientes que debe variar en dos niveles uno superior y otro inferior. Por ello se fija un límite superior de 50 plantas de Totora, y límite inferior de 25 plantas de Totora. (Avila, 2020).

- **Tiempo de retención**

El límite mayor del tiempo de retención está fijado en 24 horas mientras que el límite menor se ha establecido en el tiempo inicial es decir a las 0 horas.

2.4.3 Construcción de un diseño factorial completo 2^k

Por su sencillez, una matriz de experimentos factorial completa 2^k , debe diseñarse de acuerdo a los requerimientos de entrada de variables que requiere el software especializado para discriminar y recategorizar las variables experimentales, como es el SPSS.

De acuerdo a Montgomery (1991), el diseño experimental, es una técnica que tiene como objetivo definir una serie de pruebas en las cuales existen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de tal manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios que se producen en la respuesta de salida, de tal modo que el investigador obtenga estimaciones con la mayor precisión posible.

Para la determinación de la superficie de respuesta se pretende estimar la función:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Para ello se utiliza el desarrollo de Taylor de tal función:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 + \dots$$

Para poder determinar las variables significativas en el presente trabajo experimental se plantea un diseño factorial de 2 niveles y 2 variables o parámetros con 2 repeticiones.

Para el diseño experimental, cada factor se estudia a sólo dos niveles y sus experimentos contemplan todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores. Muestra las matrices 2^2 , 2^3 y 2^4 , para el estudio de 2, 3 y 4 factores respectivamente. La matriz comprende 2^k filas ($2 \times 2 \times 2 = 2^k$ experimentos) y k columnas, que corresponden a las k variables en estudio.

Para el caso del diseño experimental que nos toca:

$2^2 = 4$ filas y 2 columnas

Se asumen que las variables controlables o factores para el ensayo experimental son:

Factores:

C = Cantidad de plantas

T = Tiempo de retención (hr)

A continuación, en la tabla se muestran las variables o parámetros elegidos para el proceso seleccionado.

Tabla II-4. Variables Elegidas

Factores	Inferior (-1)	Superior (+)
C=Cantidad de plantas	25	50
T= Tiempo de retención (hr)	0	24

Fuente: Elaboración propia, 2024

2.4.3.1 Dominio Experimental ó Matriz de Diseño

Tabla II-5. Matriz de Diseño

Exp.	C	T(hr)
1.-	-	-
2.-	+	-
3.-	-	+
4.-	+	+

Fuente: Elaboración propia, 2024

Posteriormente se elabora el plan de experimentación que se obtiene al reemplazar los valores – y + por los valores de las variables reales que se desarrolla.

– = Valor Bajo; Límite inferior

+ = Valor Alto; Límite superior

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial de 2^2 (dos niveles, dos variables).

N° variables= 2

Niveles= 2

N° de experimentos= $2^2 = 4$

Como se harán 2 repeticiones entonces:

N° de experimentos= $4*2= 8$ experimentos

Considerando las combinaciones de estas variables se determina cuál de ellas es la más significativa cuando se toma el rendimiento como variable respuesta.

Se puede observar el diseño factorial resultante en el Anexo 6.

La matriz de diseño para el estudio se concreta sustituyendo los valores +1 y -1 de las variables codificadas por los valores de las variables reales. Así se obtiene el plan de

experimentación que comprende de forma estructurada y comprensible la lista de experimentos a realizar tal como se muestra a continuación.

Dónde:

Resp 1= Respuesta uno

Resp 2= Respuesta dos

N°= Número de ensayos

Tabla II-6. Plan de Experimentación de los Factores en Estudio

N° Exp.	Factores		Variable respuesta
	C	T(hr)	Rendimiento en la remoción de Pb (%)
1.-	25	0	R ₁
2.-	50	0	R ₂
3.-	25	24	R ₃
4.-	50	24	R ₄
5.-	25	0	R ₅
6.-	50	0	R ₆
7.-	25	24	R ₇
8.-	50	24	R ₈

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla II-7. Diseño Factorial

DISEÑO FACTORIAL			
Exp.	C	T(hr)	Rendimiento (%)
1.-	25	0	0
2.-	50	0	0
3.-	25	24	88,973
4.-	50	24	97,049
5.-	25	0	0
6.-	50	0	0
7.-	25	24	83,459
8.-	50	24	98,314

Fuente: Elaboración propia, 2024

El análisis estadístico de los resultados se realizó aplicando el software SPSS y se muestran en el Anexo 6.

CAPITULO III
RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Caracterización de las Aguas del Efluente de la Mina Perales en cuanto a Plomo, Cadmio y Zinc en base al RMCH

Se realiza una caracterización de las aguas del efluente de la Mina Perales antes de que entren al tratamiento de biofiltración para tener conocimiento de las condiciones iniciales de éstas.

A pesar de que se realizan cuatro pruebas todas corresponden a un solo muestreo de agua, por lo tanto, se realiza un solo análisis de laboratorio.

Esta caracterización se realizó comparando los resultados de indicadores analizados en laboratorio (Pb, Cd, Zn), con los parámetros establecidos en el artículo 6 del RMCH de la Ley 1333 del Medio Ambiente.

El resultado de laboratorio se ordena en tablas, se coloreo de celeste los resultados de los indicadores que correspondían según el RMCH a los niveles de la clase “A”, de verde si correspondían a los niveles de la clase “B”, amarillo si correspondían a los niveles de la clase “C”, naranja si correspondían a los niveles de la clase “D” y los resultados fuera de estos límites se coloreo de rojo para indicar un estado crítico.

Tabla III-1. Caracterización de las Aguas del Efluente de la Mina Perales

Concentración del metal expresada en mg/l		Concentración máxima según el RMCH expresada en mg/l			
		Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Cadmio	0,069	0,005	0,005	0,005	0,005
Plomo	0,74	0,05	0,05	0,05	0,1
Zinc	12,8	0,2	0,2	0,5	5

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se puede observar en la Tabla III-1 las concentraciones de todos los metales son críticas, ya que para asignar cualquiera de las clases del RMCH, las concentraciones deben ser menores a 0,005 mg/l para el Cadmio, 0,1 mg/l para el Plomo y 5mg/l para el Zinc.

3.2 Parte Experimental

En la parte experimental, se considerarán dos variables: el número de plantas de Totorá en el biofiltro y el tiempo de retención del agua. En la primera parte del estudio, se emplean 50 plantas de Totorá, y se evaluaron tres diferentes tiempos de retención: 12 horas, 24 horas y 36 horas. Después de cada período de retención, se recolectan muestras de agua y se remitieron al laboratorio para su análisis.

En la segunda parte del estudio, se reduce el número de plantas en el biofiltro a 25, manteniendo los mismos tiempos de retención: 12 horas, 24 horas y 36 horas.

Para el diseño experimental solo se toman en cuenta dos variables de tiempo debido a que el modelo planteado del diseño es 2². Sin embargo, para tener una mejor interpretación de las gráficas se toman en cuenta las tres variables de tiempo.

3.2.1 Resultados de la Primera Parte Experimental

Durante la fase experimental, se consideran dos variables principales: el número de plantas de Totorá en el biofiltro y el tiempo de retención.

En la primera parte del experimento, se utilizan 50 plantas de Totorá, y para la variable de tiempo de retención se establecen tres intervalos distintos: 12 horas, 24 horas y 36 horas. Al finalizar cada uno de estos períodos, se toman muestras de agua y se mandaron al laboratorio CEANID para su análisis correspondiente.

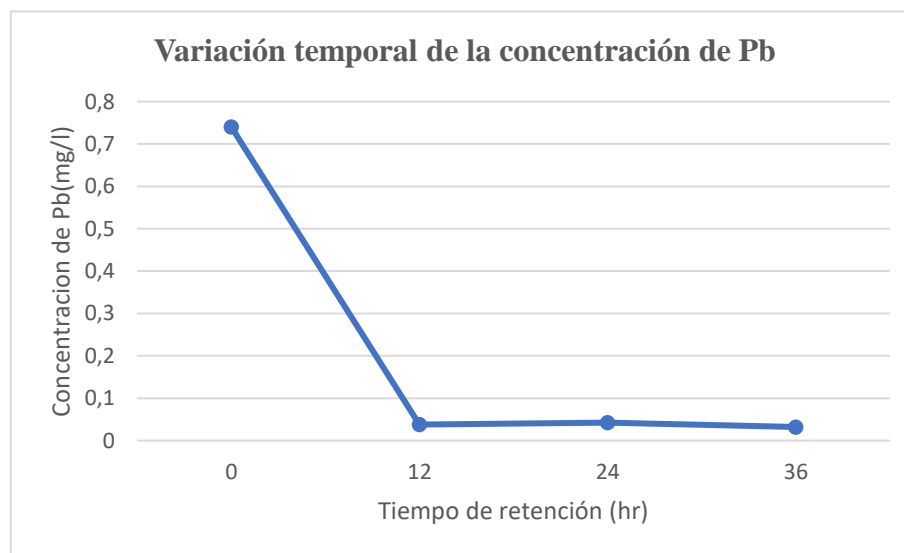
3.2.1.1. Comportamiento del Plomo en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

Tabla III-2. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Pb (mg/l)
0	0,74
12	0,038
24	0,042
36	0,032

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-1. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

Los niveles de Plomo muestran claramente una variación temporal según la Tabla III-2 y la figura 3-1. A las 12 horas de retención del agua en el biofiltro se observa una disminución muy significativa de la concentración de 0,74mg/l a la entrada del biofiltro a 0,038mg/l a la salida del biofiltro.

Luego para un tiempo de retención de 24 horas se observa un ascenso de la concentración hasta 0,042 mg/l, sin embargo, para un tiempo de retención de 36 horas la concentración de Plomo alcanza un valor de 0,032mg/l.

3.2.1.2 Comportamiento del Plomo en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

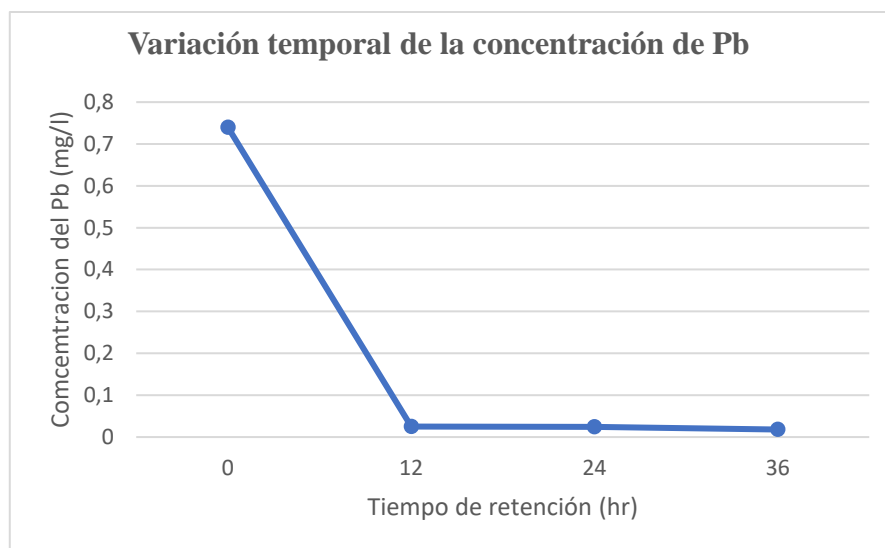
En la repetición del experimento, según la Tabla III-3 y la figura 3-2, se observa un comportamiento consistente con la primera réplica, evidenciando una disminución progresiva de la concentración de Plomo a lo largo del tiempo. A las 12 horas, la concentración descendió de 0,74 mg/l a 0,025 mg/l, luego, a las 24 horas, disminuyó a 0,024 mg/l, y finalmente, a las 36 horas, alcanzó 0,018 mg/l. Estos resultados confirman la efectividad del sistema de biofiltración para la remoción de Plomo del agua.

Tabla III-3. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Pb (mg/l)
0	0,74
12	0,025
24	0,024
36	0,018

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-2. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.1.3 Comparación de Ambas Réplicas del Plomo

El primer ensayo muestra una tendencia a la disminución de la concentración del Plomo con una leve fluctuación a las 24 horas, mientras que el segundo ensayo muestra una disminución continua y más pronunciada de la concentración de este metal.

Sin embargo, los resultados de ambos ensayos con 50 plantas de Totora en el biofiltro con respecto a los tiempos de retención estudiados muestran el mismo comportamiento con muy buena remoción en cuanto al contaminante Plomo.

3.2.1.4 Comportamiento del Cadmio en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

En cuanto al Cadmio, según Tabla III-4 y figura 3-3, en la primera réplica se observa una reducción significativa de su concentración a lo largo del sistema de biofiltración.

A la entrada del biofiltro, la concentración de este metal es de 0,069 mg/l, la cual disminuye a 0,011 mg/l tras 12 horas de retención en el biofiltro. Posteriormente, a las 24 horas, la concentración descendió a 0,009 mg/l y, finalmente, a las 36 horas, alcanza

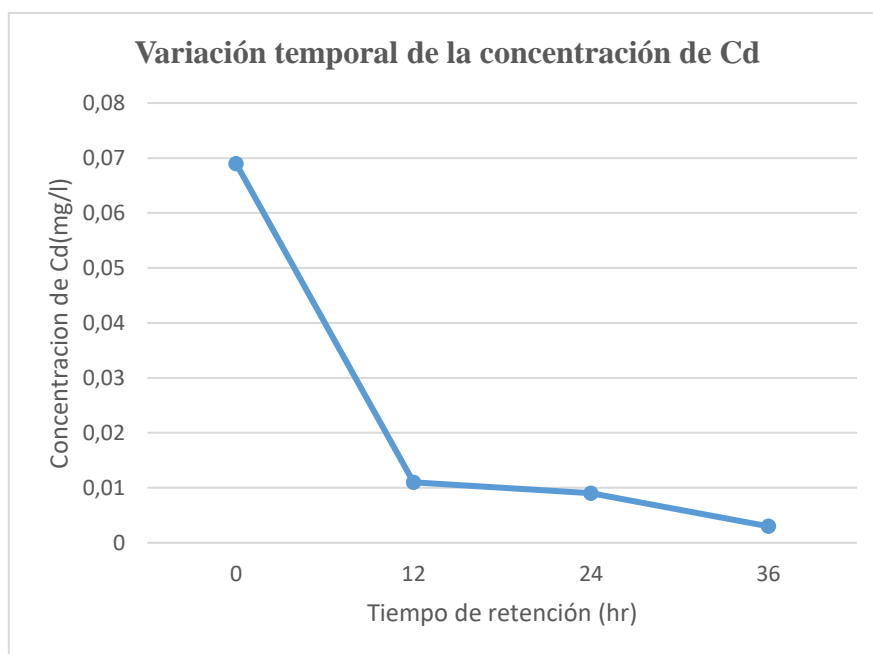
su valor más bajo de 0,003 mg/l. Estos resultados confirman la eficacia del biofiltro en la remoción de Cadmio del agua contaminada.

Tabla III-4. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Cd (mg/l)
0	0,069
12	0,011
24	0,009
36	0,003

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-3. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

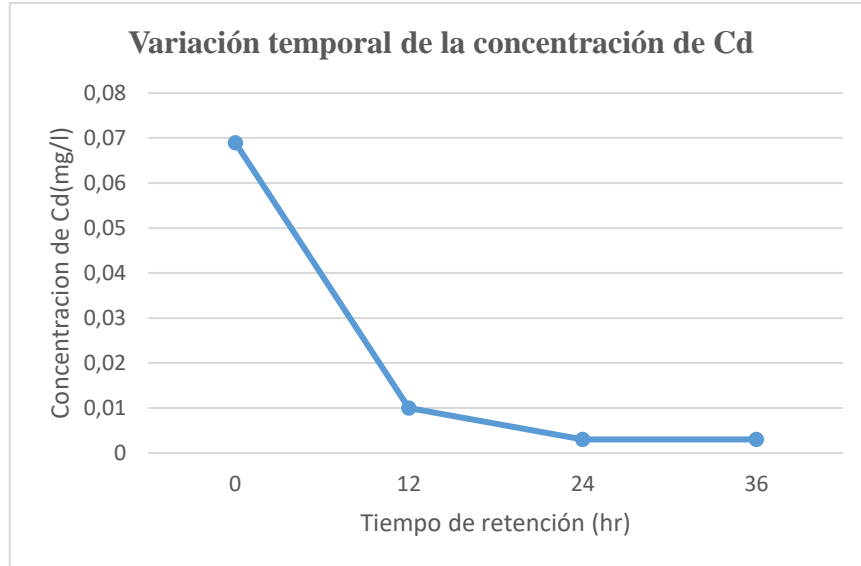
3.2.1.5 Comportamiento del Cadmio en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

Tabla III-5. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Cd (mg/l)
0	0,069
12	0,01
24	0,003
36	0,003

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-4. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

En la segunda réplica, según la Tabla III-5 y la figura 3-4, se observa una reducción progresiva de la concentración de Cadmio a lo largo del tiempo.

Después de 12 horas de retención en el biofiltro, la concentración disminuye de 0,069 mg/l a 0,01 mg/l. Luego, a las 24 horas, se reduce aún más a 0,003 mg/l, y esta concentración se mantiene constante a las 36 horas. Estos resultados reafirman la eficacia del sistema de biofiltración en la remoción del Cadmio presente en el agua tratada.

3.2.1.6 Comparación de Ambas Réplicas del Cadmio

Los resultados con respecto al contaminante Cadmio en ambos ensayos con 50 plantas de Totora en el biofiltro y con respecto a los tiempos de retención estudiados son muy similares, por lo que podemos concluir que la remoción del Cadmio es efectiva.

3.2.1.7 Comportamiento del Zinc en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

Según la Tabla III-6 y figura 3-5, la evolución de la concentración de Zinc con el tiempo revela una marcada reducción. A las 12 horas de retención en el biofiltro, la concentración disminuye de 12,8 mg/l, registrada a la entrada del sistema, a 3,35 mg/l en el efluente del biofiltro.

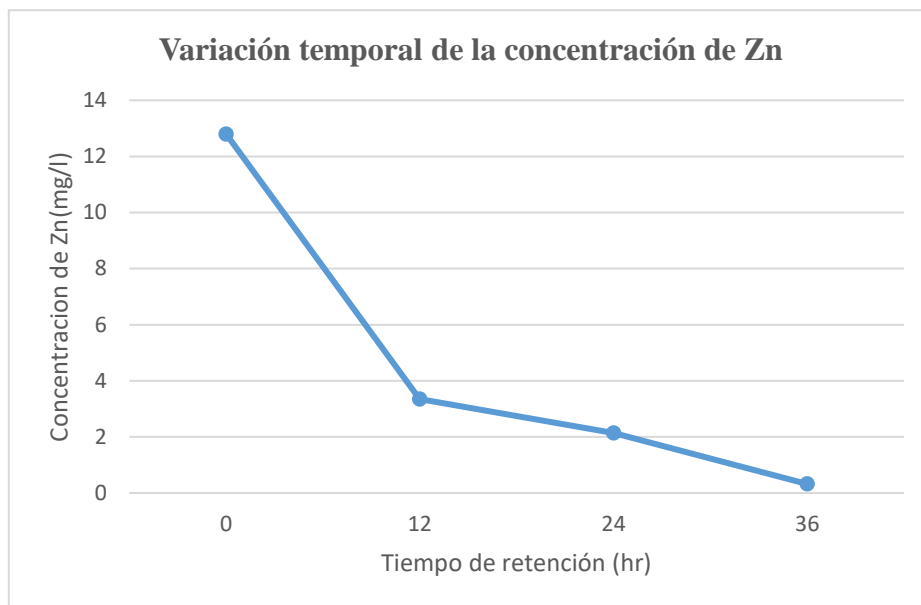
Transcurridas 24 horas, se observó una disminución adicional, alcanzando una concentración de 2,14 mg/l. Finalmente, a las 36 horas, la concentración de Zinc se reduce significativamente a 0,32 mg/l.

Tabla III-6. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Zn (mg/l)
0	12,8
12	3,35
24	2,14
36	0,32

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-5. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

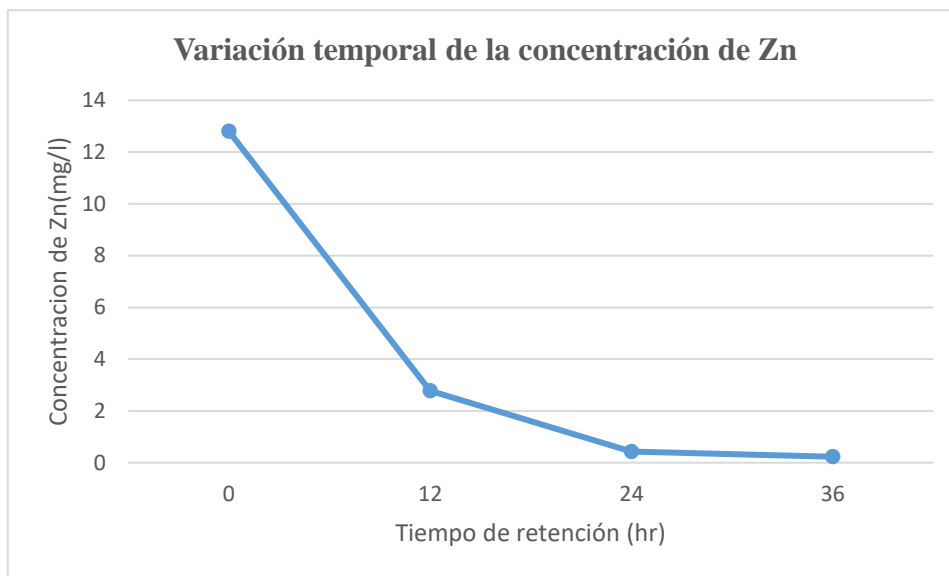
3.2.1.8 Comportamiento del Zinc en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

Tabla III-7. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Zn (mg/l)
0	12,8
12	2,78
24	0,43
36	0,23

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-6. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 50 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

En la segunda réplica, según Tabla III-7 y figura 3-6 se observa una disminución progresiva en la concentración de Zinc con el transcurso del tiempo.

La concentración inicial de Zinc a la entrada del biofiltro fue de 12,8 mg/l. Después de 12 horas de retención en el biofiltro, esta concentración se reduce a 2,78 mg/l, y a las 24 horas, disminuye aún más a 0,43 mg/l. Finalmente, al cabo de 36 horas, la concentración de Zinc se reduce notablemente a 0,23 mg/l.

3.2.1.9 Comparación de Ambas Réplicas de Zinc

Ambos ensayos muestran una disminución progresiva en la concentración del contaminante Zinc, aunque con diferencias en la consistencia de la reducción. Se logra observar una disminución más pronunciada y continua en el segundo ensayo en comparación con el primer ensayo, sin embargo, ambos ensayos con 50 plantas de Totora en el biofiltro con respecto a los tiempos de retención estudiados muestran un comportamiento similar y que, por tanto, la remoción del Zinc es efectiva.

3.2.2 Resultados de la Segunda Parte Experimental

En la segunda parte del experimento, se considerarán dos variables de estudio principales: el número de plantines; 25 plantas de Totora, y el tiempo de retención, que se divide en tres intervalos distintos: 12 horas, 24 horas y 36 horas.

Al finalizar cada uno de estos períodos, se extraen muestras de agua, las cuales son enviadas al laboratorio CEANID para su análisis correspondiente.

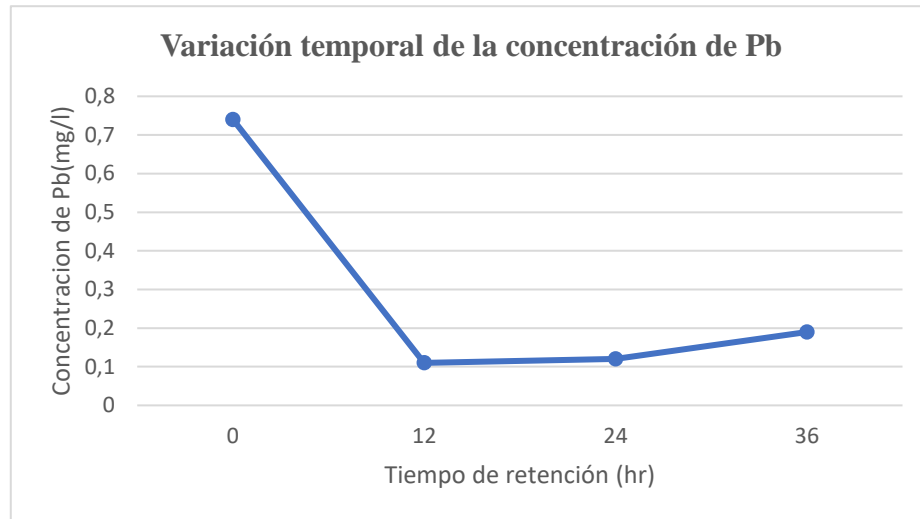
3.2.2.1 Comportamiento del Plomo en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora

Tabla III-8. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Pb (mg/l)
0	0,74
12	0,11
24	0,12
36	0,19

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-7. Comportamiento del Pb en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

En este caso, según la Tabla III-8 y figura 3-7, se observa una disminución inicial significativa en la concentración del contaminante Plomo, partiendo de 0,74 mg/l en el agua de entrada, luego el descenso a 0,11 mg/l después de 12 horas de retención en el sistema de tratamiento indica una remoción eficiente del contaminante durante las etapas iniciales.

Sin embargo, a las 24 horas, la concentración del contaminante muestra una ligera fluctuación a 0,12 mg/l, y esta tendencia al aumento se mantiene a las 36 horas, con una concentración de 0,19 mg/l. Estos resultados muestran una posible saturación del sistema de tratamiento ya que a partir de las 24 horas se reduce la remoción del Plomo con el tiempo de retención.

3.2.2.2 Comportamiento del Plomo en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

En la segunda réplica según la Tabla III-9 y figura 3-8, los resultados muestran una tendencia clara de reducción en la concentración de Plomo a lo largo del tiempo durante el proceso de tratamiento.

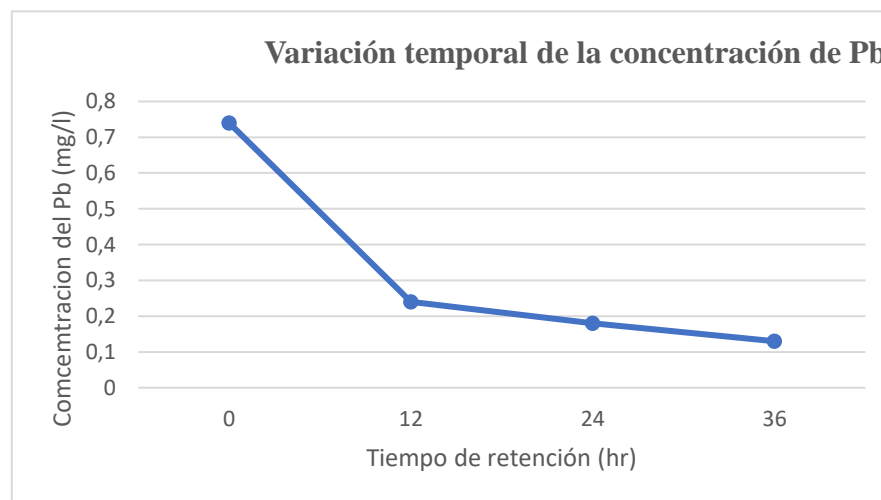
Inicialmente, la concentración de Plomo era de 0,74 mg/l, a las 12 horas disminuye a 0,24 mg/l. Luego a las 24 horas, se observa una nueva disminución en la concentración de Plomo, alcanzando un valor de 0,18 mg/l. Finalmente, a las 36 horas, la concentración de Plomo se estabiliza en 0,13 mg/l.

Tabla III-9. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Pb (mg/l)
0	0,74
12	0,24
24	0,18
36	0,13

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-8. Comportamiento del Pb en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora



Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.3 Comparación de Ambas Réplicas de Plomo

En el primer ensayo con 25 plantas de Totorá y a las 12 horas de tiempo de retención se observa una tendencia de eficiente remoción. Para los siguientes tiempos se observan fluctuaciones en la concentración de Plomo. Sin embargo, el segundo ensayo muestra una disminución continua y más pronunciada en la concentración de Plomo, lo que sugiere una mayor eficacia y consistencia en el proceso de tratamiento.

Estos resultados de ambos ensayos con 25 plantas de Totorá en el biofiltro con respecto a los tiempos de retención estudiados indican que el sistema de tratamiento ha logrado una reducción significativa en la concentración de Plomo en el agua tratada. Por otro lado, también sugieren la necesidad de un monitoreo continuo y posibles ajustes en el proceso para mantener o mejorar su eficacia a largo plazo.

3.2.2.4 Comportamiento del Cadmio en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totorá

Los resultados para el Cadmio según la Tabla III-10 inicialmente muestran una tendencia de reducción en la concentración de Cadmio a medida que transcurre el tiempo durante el proceso de tratamiento.

Inicialmente, la concentración de Cadmio es medida en 0,069 mg/l, y disminuyó a 0,038 mg/l después de 12 horas.

A las 24 horas, se observa un ligero aumento en la concentración de Cadmio, alcanzando un valor de 0,042 mg/l, y por último a las 36 horas, la concentración de Cadmio vuelve a aumentar ligeramente a 0,049 mg/l.

Aunque esta variación es mínima, podría indicar una saturación parcial del sistema de tratamiento o una disminución en la eficiencia de remoción durante este período de tiempo específico.

Tabla III-10. Comportamiento del Cd en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Cd (mg/l)
0	0,069
12	0,038
24	0,042
36	0,049

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.5 Comportamiento del Cadmio en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

Los resultados obtenidos según la Tabla III-11 muestran una variación en la concentración de Cadmio a lo largo del tiempo. La concentración inicial del Cadmio fue de 0,069 mg/l, y se observa una disminución significativa a 0,011 mg/l después de 12 horas en el sistema de tratamiento.

Sin embargo, a las 24 horas, se observa un aumento inesperado en la concentración de Cadmio, llegando a 0,089 mg/l. Pero a las 36 horas, la concentración de Cadmio disminuye nuevamente a 0,066 mg/l. No obstante, este valor sigue siendo más alto que la concentración observada a las 12 horas, por lo que nos podría estar indicando una saturación del sistema.

Tabla III-11. Comportamiento del Cd en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Cd (mg/l)
0	0,069
12	0,11
24	0,089
36	0,066

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.6 Comparación de Ambas Réplicas de Cadmio

Los resultados de ambas réplicas para el Cadmio durante el estudio utilizando 25 plantas de Totora en el biofiltro no son del todo satisfactorios. Se observa que, en ambos casos, hay una disminución en la concentración de Cadmio durante las primeras 12 horas, pero esta remoción no se mantiene en los tiempos de retención posteriores estudiados. En lugar de ello, se registró un aumento en la concentración de Cadmio a las 24 y 36 horas en ambos ensayos.

Este incremento en las concentraciones sugiere la posibilidad de que el sistema esté saturado con respecto a este contaminante, lo que impide una remoción efectiva del Cadmio.

3.2.2.7 Comportamiento del Zinc en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora

Según la Tabla III-12 de los resultados obtenidos para el Zinc indican a las 12 horas una remoción moderada de 12,8 mg/l a 9,4 mg/l en el sistema de tratamiento. Sin embargo, a las 24 horas, se produce un aumento significativo en la concentración de Zinc, llegando a 14 mg/l y a las 36 horas, la concentración de Zinc continúa aumentando, alcanzando los 16,1 mg/l.

Tabla III-12. Comportamiento del Zn en la Primera Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Zn (mg/l)
0	12,8
12	9,4
24	14
36	16,1

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.8 Comportamiento del Zinc en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

En la segunda réplica con respecto al Zinc según la Tabla III-12, muestra una variación notable en la concentración de Zinc a lo largo del tiempo durante el proceso de tratamiento. La concentración inicial de Zinc es de 12,8 mg/l, observándose un aumento significativo a 34,8 mg/l después de 12 horas en el sistema de tratamiento. Luego, a las 24 horas, se produce una disminución en la concentración de Zinc, descendiendo a 23,6 mg/l. A las 36 horas, la concentración de Zinc continúa disminuyendo, llegando a 14,9 mg/l.

Tabla III-13. Comportamiento del Zn en la Segunda Réplica con 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Zn (mg/l)
0	12,8
12	34,8
24	23,6
36	14,9

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.9 Comparación de Ambas Réplicas de Zinc

Ambos ensayos realizados en este estudio utilizando 25 plantas de Totorá, revelan que el sistema no está funcionando de manera eficiente en lo que respecta al tratamiento del Zinc. En varios puntos del estudio, en lugar de observar una disminución en las concentraciones de Zinc a medida que pasa el tiempo de retención, se registran aumentos inesperados. Estos incrementos repentinos sugieren la posibilidad de que el sistema esté saturado con respecto a este contaminante.

3.2.3 Saturación del Sistema

En la primera etapa del estudio, que involucra 50 plantines de Totorá con diferentes tiempos de retención 12, 24 y 36 horas, se observa una eficiente remoción de los tres metales estudiados. Sin embargo, en la segunda etapa, donde se utilizaron solo 25 plantas de Totorá en los mismos tiempos de retención, se encuentra una buena remoción solo para el Plomo, no así para el Cadmio y el Zinc. En el caso de estos últimos, se registraron bajas remociones a las 12 horas, seguidas de incrementos en las concentraciones a partir de las 24 horas. Lo que se puede decir es que a mayor densidad de plantas por metro cuadrado de superficie del biofiltro existe una mayor remoción.

Este aumento en las concentraciones podría ser indicativo de una saturación del material de filtración, en este caso, la Totorá, que, al llegar a un punto máximo de adsorción, devuelve los contaminantes al medio. Una de las razones detrás de este comportamiento diferencial en la adsorción del Plomo en comparación con el Cadmio y el Zinc radica en el mayor tamaño de radio iónico del Plomo, lo que le otorga una mayor superficie de contacto con la Totorá. Como resultado, el Plomo ocupa primero los sitios de adsorción disponibles, dejando menos espacio para la adsorción del Cadmio y el Zinc.

Los radios iónicos del Plomo, Cadmio y Zinc son, respectivamente, 133 pm, 109 pm y 88 pm, (Petrucci, Harwood, Herring, 2002) lo que confirma que un átomo iónico de Plomo es de mayor tamaño que el Cadmio, y este a su vez es más grande que el Zinc.

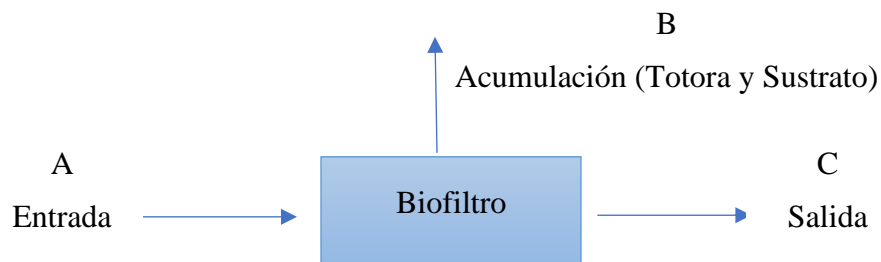
Por otro lado, es importante destacar que la Totorá alcanza su marchitez aproximadamente después de 5 meses, coincidiendo con la realización del ensayo con los 25 plantines de Totorá y los diferentes tiempos de retención estudiados.

Debido a estas incongruencias en los resultados de la parte experimental para el Cadmio y Zinc, no se tomó en cuenta estos parámetros para el balance de materia, rendimiento y comparación con el RMCH.

3.3 Balance de Materia

A continuación, se muestran las tablas de cálculos y resultados del balance de materia:

3.3.1 Balance de Materia para la Primera Parte Experimental



3.3.1.1 Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 50 Plantas de Totorá

Como se describe en el capítulo anterior de la metodología, el estudio de los volúmenes para los tiempos de retención de 12 y 24 horas se lleva a cabo de manera independiente a la toma de muestras en la salida del biofiltro. Esto significa que, para estos intervalos de tiempo, se colocan 50 litros de agua corriente en el biofiltro y se extrae esta agua del biofiltro a las 12 horas, repitiendo este proceso a las 24 horas. En el caso de las 36 horas, el volumen desalojado se mide en el momento de la toma de muestra. Esta metodología se implementa debido a la disponibilidad limitada de agua del efluente de la mina en Huacata

Balance Global:

$$A=B+C$$

$$B=A-C$$

Tabla III-14. Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 50 Plantas de Totorá

Tiempo de retención (hr)	A (Volumen de entrada) (l)	C (Volumen de salida) (l)	B (Volumen acumulado en Totorá y Sustrato) (l)
12	50	38	12
24	50	26	24
36	50	12	38

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.1.2 Balance Parcial de Metales Pesados con 50 Plantas de Totorá Primera y Segunda Réplica

Se realizó el cálculo de la concentración de los tres metales en B, es decir, lo acumulado en la Totorá y sustrato, mediante el balance parcial de materia.

Este análisis se realizó para el estudio con 50 plantas de Totorá con sus respectivos tiempos de estudio para ambas réplicas

3.3.1.2.1 Balance Parcial del Plomo

Concentración de Plomo en B (Totorá y Sustrato) (mg/l):

$$Pb = \frac{(C_A * V_A) - (C_C * V_C)}{V_B}$$

Tabla III-15. Balance Parcial del Pb Primera Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (C _A)	Salida Pb (mg/l) (C _C)	V _A (l)	V _C (l)	V _B (l)	Concentración en B (Totorá y Sustrato) Pb(mg/l)
12	0,74	0,038	50	38	12	2,963
24	0,74	0,042	50	26	24	1,496
36	0,74	0,032	50	12	38	0,964

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-16. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	V_A (l)	V_C (l)	V_B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Pb(mg/l)
12	0,74	0,025	50	38	12	3,004
24	0,74	0,024	50	26	24	1,516
36	0,74	0,018	50	12	38	0,968

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se observa en la Tabla III-15 y Tabla III-16 que la cantidad de Plomo acumulado en la Totora y sustrato es similar en la primera y segunda réplica.

El balance expresado en unidades de mg/g H₂O tomando la densidad del agua como 1g/ml:

Tabla III-17. Balance Parcial del Pb Primera Replica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g H₂O a la entrada (A)	mgPb/g H₂O a la salida (C)	mgPb/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,00074	0,000038	0,000702
24	0,00074	0,000042	0,000698
36	0,00074	0,000032	0,000708

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-18. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g H ₂ O a la entrada (A)	mgPb/g H ₂ O a la salida (C)	mgPb/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,00074	0,000025	0,000715
24	0,00074	0,000024	0,000716
36	0,00074	0,000018	0,000722

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.1.2.2 Balance Parcial del Cadmio

Concentración de Cadmio en B (Totora y Sustrato) (mg/l):

$$Cd = \frac{(C_A * V_A) - (C_C * V_C)}{V_B}$$

Tabla III-19. Balance Parcial del Cd Primera Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	V _A (l)	V _C (l)	V _B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Cd(mg/l)
12	0,069	0,011	50	38	12	0,253
24	0,069	0,009	50	26	24	0,134
36	0,069	0,003	50	12	38	0,090

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-20. Balance Parcial del Cd Segunda Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	V _A (l)	V _C (l)	V _B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Cd(mg/l)
12	0,069	0,01	50	38	12	0,256
24	0,069	0,003	50	26	24	0,141
36	0,069	0,003	50	12	38	0,090

Fuente: Elaboración propia, 2024

Según la Tabla III-19 y Tabla III-20 se puede observar que la cantidad de Cadmio acumulado en la Totora y el sustrato es bastante similar tanto en la primera réplica como en la segunda.

El balance expresado en unidades de mg/g H₂O tomando la densidad del agua como 1g/ml:

Tabla III-21. Balance Parcial del Cd Primera Replica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgCd/g H ₂ O a la entrada (A)	mgCd/g H ₂ O a la salida (C)	mgCd/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,000069	0,000011	0,000058
24	0,000069	0,000009	0,00006
36	0,000069	0,000003	0,000066

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-22. Balance Parcial del Cd Segunda Replica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgCd/g H ₂ O a la entrada (A)	mgCd/g H ₂ O a la salida (C)	mgCd/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,000069	0,00001	0,000059
24	0,000069	0,000003	0,000066
36	0,000069	0,000003	0,000066

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.1.2.3 Balance Parcial del Zinc

Concentración de Zinc en B (Totora y Sustrato) (mg/l):

$$Zn = \frac{(C_A * V_A) - (C_C * V_C)}{V_B}$$

Tabla III-23. Balance Parcial del Zn Primera Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	V _A (l)	V _C (l)	V _B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Zn(mg/l)
12	12,8	3,35	50	38	12	42,725
24	12,8	2,14	50	26	24	24,348
36	12,8	0,32	50	12	38	16,741

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-24. Balance Parcial del Zn Segunda Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	V _A (l)	V _C (l)	V _B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Zn(mg/l)
12	12,8	2,78	50	38	12	44,530
24	12,8	0,43	50	26	24	26,201
36	12,8	0,23	50	12	38	16,769

Fuente: Elaboración propia, 2024

Los resultados de los cálculos en la Tabla III-23 y Tabla III-24 muestran que, al igual que en los casos del Plomo y el Cadmio, la acumulación en ambas réplicas es similar. Sin embargo, entre los tres metales, el Zinc es el que muestra la mayor discrepancia en las concentraciones entre ambas réplicas.

El balance expresado en unidades de mg/g H₂O tomando la densidad del agua como 1g/ml:

Tabla III-25. Balance Parcial del Zn Primera Replica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgZn/g H ₂ O a la entrada (A)	mgZn/g H ₂ O a la salida (C)	mgZn/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,0128	0,00335	0,00945
24	0,0128	0,00214	0,01066
36	0,0128	0,00032	0,01248

Fuente: Elaboración propia, 2024

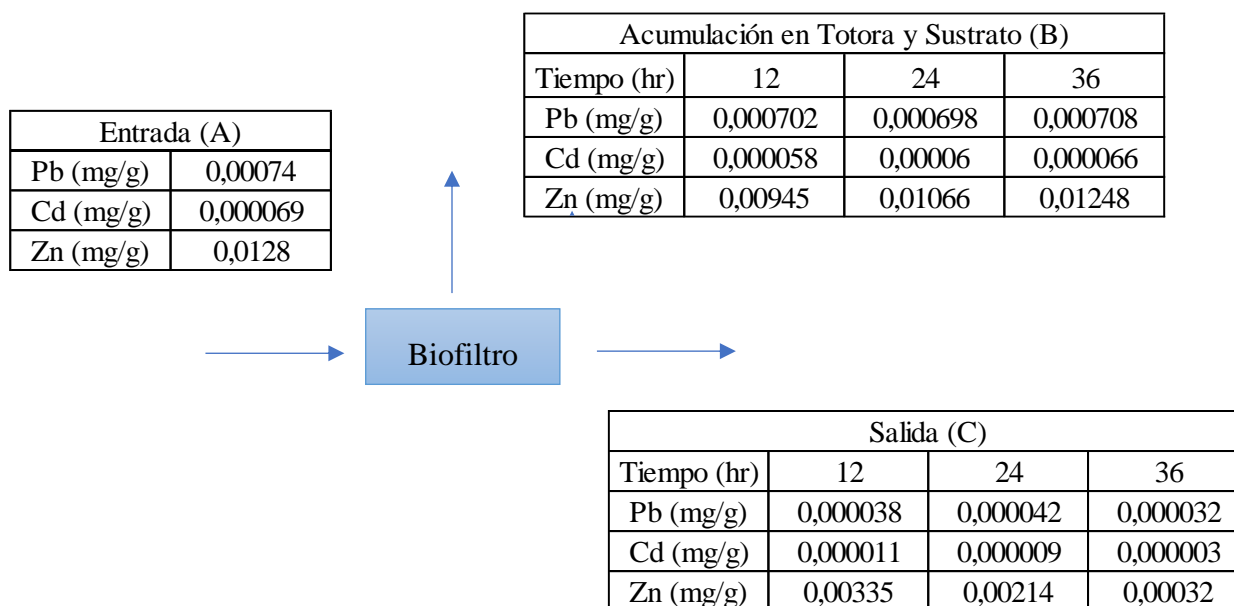
Tabla III-26. Balance Parcial del Zn Segunda Replica en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgZn/g H ₂ O a la entrada (A)	mgZn/g H ₂ O a la salida (C)	mgZn/g acumulada en Totora y sustrato (B)
12	0,0128	0,00278	0,01002
24	0,0128	0,00043	0,01237
36	0,0128	0,00023	0,01257

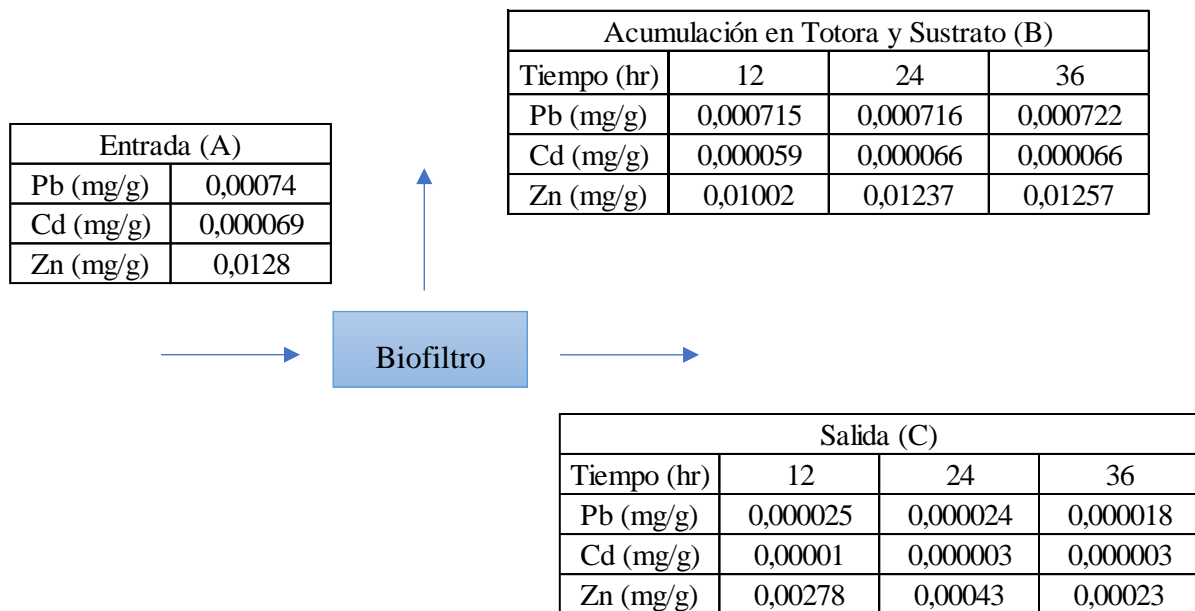
Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.2 Resumen del Balance de Materia para la Primera Parte Experimental

-Balance Parcial con 50 plantas de Totora-Primera Réplica



-Balance Parcial con 50 plantas de Totora-Segunda Réplica



3.3.3 Balance de Materia para la Segunda Parte Experimental

3.3.3.1 Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 25 Plantas de Totora

Balance de materia para la primera réplica con 25 plantas.

Tabla III-27. Volúmenes de Agua en el Biofiltro para 25 Plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	A (Volumen de entrada) (l)	C (Volumen de salida) (l)	B (Volumen acumulado en Totora y Sustrato) (l)
12	50	42	8
24	50	34	16
36	50	27	23

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.3.2 Balance Parcial de Metales Pesados con 25 Plantas de Totora Primera y Segunda Réplica

Debido a que en la segunda réplica con las 25 plantas de Totora los resultados reflejan variaciones inconsistentes para el Cadmio y el Zinc, no se toma en cuenta estos dos metales para el balance de materia.

3.3.3.3 Balance Parcial del Plomo

Concentración de Plomo en B (Totora y Sustrato) (mg/l):

$$Pb = \frac{(C_A * V_A) - (C_C * V_C)}{V_B}$$

Tabla III-28. Balance Parcial del Pb Primera Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Pb(mg/l)
12	0,74	0,11	50	42	8	4,048
24	0,74	0,12	50	34	16	2,058
36	0,74	0,19	50	27	23	1,386

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-29. Balance Parcial del Pb Segunda Réplica en Concentración

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	B (l)	Concentración en B (Totora y Sustrato) Pb(mg/l)
12	0,74	0,24	50	42	8	3,365
24	0,74	0,18	50	34	16	1,930
36	0,74	0,13	50	27	23	1,456

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se puede ver en la Tabla III-28 y Tabla III-29, las concentraciones de Plomo acumuladas en ambas réplicas son semejantes. No obstante, en comparación con el

caso de la concentración de Plomo estudiado con las 50 plantas de Totorá, se observa una mayor variación de las concentraciones entre ambas réplicas.

El balance expresado en unidades de mg/g H₂O tomando la densidad del agua como 1g/ml:

Tabla III-30. Balance Parcial del Pb Primera Replicación en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g H ₂ O a la entrada (A)	mgPb/g H ₂ O a la salida (C)	mgPb/g acumulada en Totorá y sustrato (B)
12	0,00074	0,00011	0,00063
24	0,00074	0,00012	0,00062
36	0,00074	0,00019	0,00055

Fuente: Elaboración propia, 2024

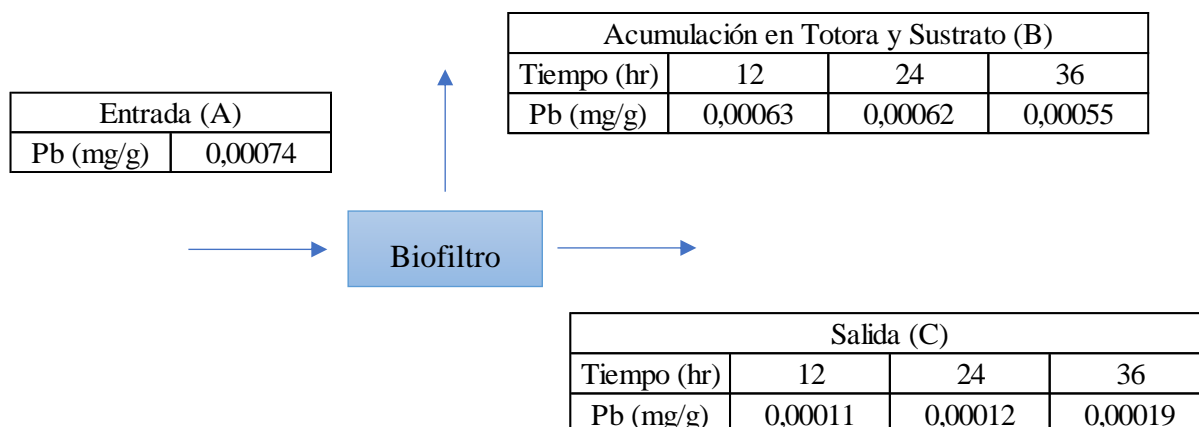
Tabla III-31. Balance Parcial del Pb Primera Replicación en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g H ₂ O a la entrada (A)	mgPb/g H ₂ O a la salida (C)	mgPb/g acumulada en Totorá y sustrato (B)
12	0,00074	0,00024	0,0005
24	0,00074	0,00018	0,00056
36	0,00074	0,00013	0,00061

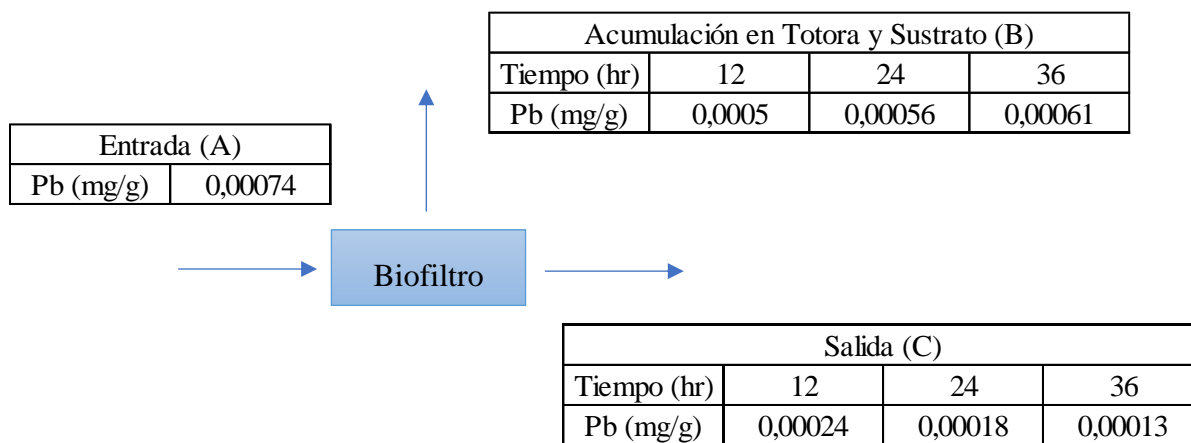
Fuente: Elaboración propia, 2024

3.3.4 Resumen del Balance de Materia para la Segunda Parte Experimental

-Balance Parcial con 25 plantas de Totora-Primera Réplica



-Balance Parcial con 25 plantas de Totora-Segunda Réplica



3.4 Acumulación de Metales Pesados en la Totora y en el Sustrato

3.4.1 Resultados de Laboratorio de Spectrolab

Se realizan análisis de Plomo, Cadmio y Zinc en el sustrato y de cenizas de la Totora, para esto se envía muestras al laboratorio Spectrolab de Oruro. El análisis corresponde a una muestra antes de ser puesta en contacto con el agua a tratar y una muestra al finalizar el experimento con las 50 plantas.

Debido a que en la segunda parte del experimento con las 25 plantas de Totora los resultados no son consistentes debido a una saturación para el caso del Cadmio y Zinc, se optó por no mandar a realizar el análisis de Plomo, Cadmio y Zinc en el sustrato y de cenizas de la Totora.

A continuación, se muestran los resultados de los análisis emitidos por el laboratorio Spectrolab para el caso de estudio con las 50 plantas.

Tabla III-32. Concentración de los Metales en el Sustrato

Parámetro	Unidades	L.D	Concentración antes del tratamiento	Concentración después del tratamiento
			S-1	S-2
Plomo	mg/kg	0,1	<0,1	<0,1
Cadmio	mg/kg	0,01	<0,01	<0,01
Zinc	mg/kg	0,5	0,5	9,2

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-33. Concentración de los Metales en la Totora

Parámetro	Unidades	L.D	Concentración antes del tratamiento	Concentración después del tratamiento
			V-1	V-2
Plomo	mg/kg	0,1	<0,1	9,55
Cadmio	mg/kg	0,01	<0,01	0,89
Zinc	mg/kg	0,5	15,2	55,7

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.4.2 Cálculo de la Acumulación de Metales Pesados en la Totora

Para calcular la acumulación de los metales estudiados en la Totora, se toman en cuenta datos que en algunos casos se obtiene a través de metodologías experimentales, como

se describió en el capítulo anterior de la metodología. Además, se utilizan los resultados de las concentraciones reportadas por el laboratorio Spectrolab.

Tabla III-34. Datos Adicionales para Cálculo de Acumulación en la Totora

Humedad de la Totora	83%
----------------------	-----

Para convertir los resultados de Spectrolab a unidades de masa se realiza el siguiente cálculo:

3.4.2.1 Cálculo para el Plomo

$$\frac{9,55\text{mgPb}}{\text{kgTotoraseca}} * \frac{17\text{kgmatseca}}{100\text{kgTatora}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 0,0016235 \text{ mgPb/g Tatora}$$

3.4.2.2 Cálculo para el Cadmio

$$\frac{0,89\text{mgCd}}{\text{kgTotoraseca}} * \frac{17\text{kgmatseca}}{100\text{kgTatora}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 0,0001513 \text{ mgCd/g Tatora}$$

3.4.2.3 Cálculo para el Zinc

$$\frac{55,7\text{mgZn}}{\text{kgTotoraseca}} * \frac{17\text{kgmatseca}}{100\text{kgTatora}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 0,009469 \text{ mgZn/g Tatora}$$

3.4.3 Cálculo de la Acumulación de Metales Pesados en el Sustrato

Para el caso del cálculo de acumulación de los metales en el sustrato solo se realizó para el Zinc debido a que como se pudo observar en la Tabla III-32 no se detecta trazas de Plomo y Cadmio en el sustrato.

Para el cálculo de acumulación de Zinc en el sustrato se usarán los siguientes datos:

Tabla III-35. Datos Adicionales para Calculo de Acumulación en el Sustrato

Densidad de la arena	1700 kg/m ³
Volumen de la arena que ocupa en el biofiltro	0,15m ³
Masa de la arena	255 kg

Para convertir los resultados de Spectrolab a unidades de masa se realiza el siguiente cálculo:

$$\frac{9,2\text{mgZn}}{\text{kg}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 0.0092\text{mgZn/g sustrato}$$

3.5 Comparación de los Resultados de Metales Acumulados en Totora y Sustrato vs Balance de Materia

Tabla III-36. Acumulación de Pb en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,000702
24	0,000698
36	0,000708

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-37. Acumulación de Pb en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgPb/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,000025
24	0,000024
36	0,000018

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-38. Acumulación de Cd en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgCd/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,000058
24	0,00006
36	0,000066

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-39. Acumulación de Cd en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgCd/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,000059
24	0,000066
36	0,000066

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-40. Acumulación de Zn en la Totora y Sustrato según el Balance para la Primera Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgZn/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,00945
24	0,01066
36	0,01248

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-41. Acumulación de Zn en la Totora y Sustrato según el Balance para la Segunda Réplica con 50 Plantas en mg/g

Tiempo de retención (hr)	mgZn/g acumulada en Totora y Sustrato
12	0,01002
24	0,01237
36	0,01257

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-42. Acumulación total de Metales Pesados en la Primera y Segunda Réplica con 50 Plantas

Parámetro	Acumulación en la Totora y Sustrato según el balance en la primera réplica (mg/g)	Acumulación en la Totora y Sustrato según el balance en la segunda réplica (mg/g)	Total (mg/g)
Plomo	0,000708	0,000722	0,00143
Cadmio	0,000066	0,000066	0,000132
Zinc	0,01248	0,01257	0,02505

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-43. Acumulación Total según Análisis de Laboratorio

Parámetro	Acumulación en la Totora según Spectrolab (mg/g)	Acumulación en el sustrato según Spectrolab (mg/g)	Total (mg/g)
Plomo	0,0016235		0,0016235
Cadmio	0,0001513		0,0001513
Zinc	0,009469	0.0092	0,018669

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-44. Comparación de Resultados de Acumulación de Metales del Balance de Materia vs Análisis de Laboratorio

Parámetro	Acumulación total en Totora y sustrato según el balance (mg/g)	Acumulación total en la Totora y sustrato según Spectrolab (mg/g)
Plomo	0,00143	0,0016235
Cadmio	0,000132	0,0001513
Zinc	0,02505	0,018669

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se puede observar en la Tabla III-44, al comparar las concentraciones de los tres metales Plomo, Cadmio y Zinc, acumulados en la Totora y el sustrato según los cálculos realizados mediante el balance, se encuentran dentro de un rango aceptable según los resultados de laboratorio. Por lo tanto, podemos confirmar que tanto la Totora para el Plomo y el Cadmio, como además el sustrato para el Zinc, son eficaces en el tratamiento de estos contaminantes.

A pesar de que en los resultados de laboratorio según Spectrolab muestran resultados para el Plomo y Cadmio por debajo del límite detectado por la técnica se procede a realizar un cálculo según la diferencia de lo calculado en el balance de materia y los resultados de laboratorio en la totora.

Como en el balance se toma la corriente B (Acumulado en la totora y sustrato), entonces tenemos que:

$$B = T + S$$

$$S = B - T$$

Donde:

B= Masa acumulada en totora y sustrato

T= Masa acumulada en la totora según resultados de laboratorio

S= Masa en el Sustrato

Tabla III-45. Acumulación en el sustrato

Parámetro	Acumulación total en totora y sedimento según el balance (mg/g)	Acumulación total en la totora según Spectrolab (mg/g)	Acumulación total en el sustrato (mg/g)
Plomo	0,00143	0,0016235	0,0001935
Cadmio	0,000132	0,0001513	0,0000193
Zinc	0,02505	0,018669	0,006381

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla III-45 se observa que el sustrato es eficiente para la eliminación del Zinc; sin embargo, muestra baja eficiencia para la remoción de Plomo y Cadmio

3.6 Rendimiento del Sistema

3.6.1 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera y Segunda Réplica para el Plomo

Los resultados de los rendimientos de remoción de Plomo según las Tabla III-46 y Tabla III-47, muestran una mejora progresiva en la eficiencia del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo. En ambas réplicas a las 12 horas, se observan rendimientos de 96,097% y de 97,432%, lo que indica una efectiva remoción del Plomo

en esta etapa inicial. Esta eficiencia se ve incrementada aún más a las 24 horas, alcanzando rendimientos de 97,049% y de 98,314%, lo que sugiere una continua mejora en la capacidad del sistema para eliminar el Plomo del agua tratada. Finalmente, a las 36 horas, se registra rendimientos del 98,962% y de 99,416%, confirmando una vez más la eficacia creciente del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo. Estos resultados demuestran una tendencia positiva en la remoción del Plomo y respaldan la efectividad del sistema de tratamiento en la purificación del agua contaminada con este metal pesado.

**Tabla III-46. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-
Primera Réplica para el Pb**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	0,74	0,038	50	38	37	1,444	96,097
24	0,74	0,042	50	26	37	1,092	97,049
36	0,74	0,032	50	12	37	0,384	98,962

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Tabla III-47. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-
Segunda Réplica para el Pb**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	0,74	0,025	50	38	37	0,95	97,432
24	0,74	0,024	50	26	37	0,624	98,314
36	0,74	0,018	50	12	37	0,216	99,416

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.6.2 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica y Segunda para el Cadmio

Como se puede ver en la Tabla III-48 y Tabla III-49 los resultados de los rendimientos en ambas réplicas muestran una tendencia creciente en la eficiencia del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo. A las 12 horas, se observan rendimientos del 87,884% y 88.,986%, lo que sugiere una efectiva remoción de contaminantes en esta etapa inicial del proceso.

A las 24 horas, los rendimientos aumentan a 93,217% y 97,739%, indicando una mejora significativa en la capacidad del sistema para eliminar los contaminantes presentes en el agua tratada.

Por último, a las 36 horas, se registran rendimientos de 98,957% y 98,9557%, confirmando una vez más la eficacia creciente del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo.

Tabla III-48. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica para el Cd

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = ((mi-mf)/mi)*100
12	0,069	0,011	50	38	3,45	0,418	87,884
24	0,069	0,009	50	26	3,45	0,234	93,217
36	0,069	0,003	50	12	3,45	0,036	98,957

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla III-49. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención- Segunda Réplica para el Cd

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	0,069	0,01	50	38	3,45	0,38	88,986
24	0,069	0,003	50	26	3,45	0,078	97,739
36	0,069	0,003	50	12	3,45	0,036	98,957

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.6.3 Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-Primera Réplica y Segunda para el Zinc

Los resultados de los rendimientos en ambas réplicas según la Tabla III-50 y Tabla III-51, muestran una mejora gradual en la eficiencia del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo. A las 12 horas, se observan rendimientos del 80,10% y 83,49%, lo que indica una remoción significativa del Zinc en esta etapa.

A las 24 horas, los rendimientos aumentan a 91,30% y 98,25%, indicando una notable mejora en la capacidad del sistema para eliminar este contaminante.

Finalmente, a las 36 horas, se registran rendimientos del 99,400% y 99,56%, confirmando una eficacia excepcional del proceso de tratamiento. Estos resultados indican una remoción prácticamente completa de los contaminantes presentes en el agua tratada, respaldando la capacidad del sistema para purificar eficientemente el agua contaminada con este metal pesado.

**Tabla III-50. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-
Primera Réplica para el Zn**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	12,8	3,35	50	38	640	127,3	80,109
24	12,8	2,14	50	26	640	55,64	91,306
36	12,8	0,32	50	12	640	3,84	99,400

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Tabla III-51. Rendimiento del Biofiltro con 50 Plantas vs Tiempos de Retención-
Segunda Réplica para el Zn**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	12,8	2,78	50	38	640	105,64	83,494
24	12,8	0,43	50	26	640	11,18	98,253
36	12,8	0,23	50	12	640	2,76	99,569

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.6.4 Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención Primera y Segunda Réplica para el Plomo

En la Tabla III-52 y Tabla III-53 los resultados de los rendimientos en las dos réplicas muestran una variabilidad en la eficiencia del proceso de tratamiento a lo largo del tiempo. A las 12 horas, se observan rendimientos del 87,514% y 72,757%, lo que sugiere una diferencia notable en la remoción de los contaminantes entre las dos réplicas en esta etapa inicial del proceso.

A las 24 horas, los rendimientos aumentan ligeramente a 88,973% y 83,459%, indicando una mejora en la capacidad del sistema para eliminar el Plomo. Sin embargo,

sigue habiendo una diferencia entre las dos réplicas en términos de eficiencia de remoción.

Al cabo de las 36 horas, se registran rendimientos de 86,135% y 90,514%, lo que muestra una estabilización en la eficiencia del proceso de tratamiento. Aunque ambas réplicas muestran una mejora en comparación con las 12 horas, aún persiste una diferencia en los rendimientos entre las dos réplicas.

**Tabla III-52. Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención-
Primera Réplica para el Pb**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	0,74	0,11	50	42	37	4,62	87,514
24	0,74	0,12	50	34	37	4,08	88,973
36	0,74	0,19	50	27	37	5,13	86,135

Fuente: Elaboración propia, 2024

**Tabla III-53. Rendimiento del Biofiltro con 25 Plantas vs Tiempos de Retención-
Segunda Réplica para el Pb**

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	A (l)	C (l)	Masa inicial (mg)	Masa final (mg)	Rend = $((mi-mf)/mi)*100$
12	0,74	0,24	50	42	37	10,08	72,757
24	0,74	0,18	50	34	37	6,12	83,459
36	0,74	0,13	50	27	37	3,51	90,514

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.7 Caracterización del Efluente del Biofiltro en cuanto a Plomo, Cadmio y Zinc en base al RMCH

La caracterización de las aguas tratadas a la salida del biofiltro se realiza conforme al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley Ambiental 1333. Se compararon los parámetros de Plomo, Cadmio y Zinc con los límites establecidos en el reglamento.

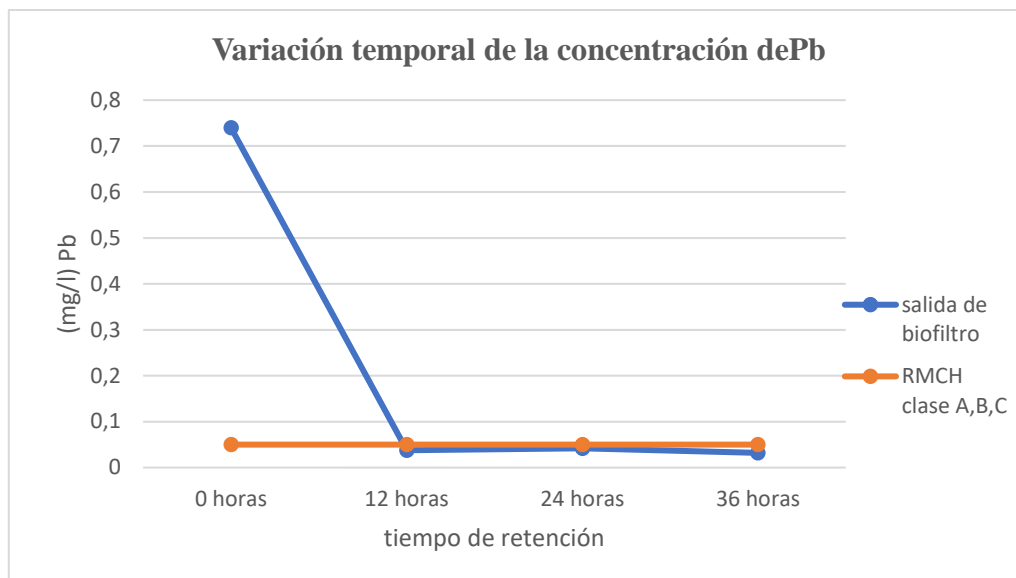
Debido a la ambigüedad del reglamento, que no especifica si los metales deben ser disueltos o totales, y considerando que las aguas tratadas contienen sólidos suspendidos, se decide evaluar estos metales en su estado total.

3.7.1 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica

Tabla III-54. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Plomo (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	0,74	0,038	0,042	0,032
Normativa (Clase A, B, C)	0,05	0,05	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-9. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

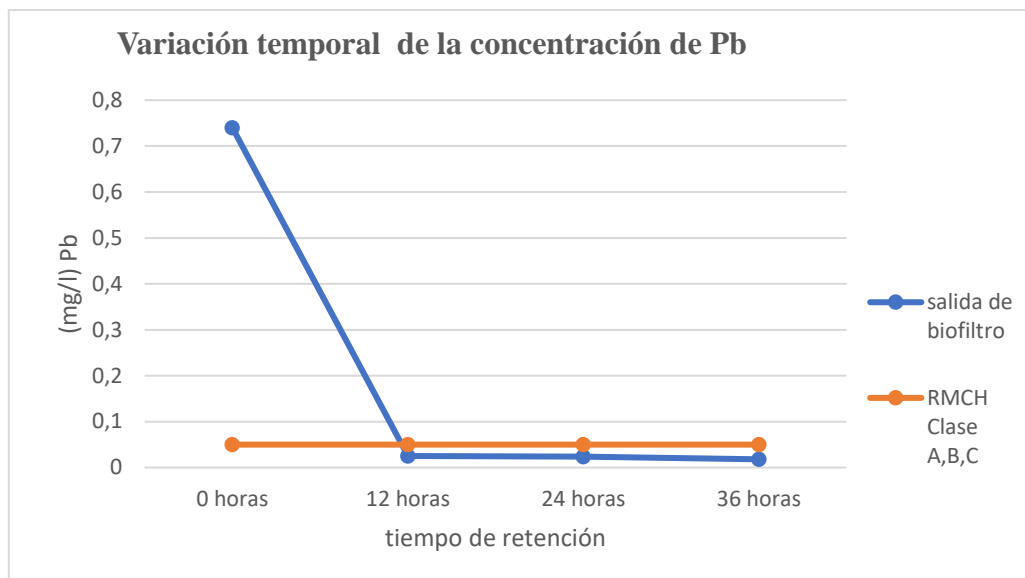
En la primera réplica según la Tabla III-54 y figura 3-9 se observa que a partir de las 12 horas de tratamiento se alcanza los niveles permitidos de las clases A, B y C para el Plomo, establecido en 0,05mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, por lo que podemos indicar que el tratamiento es efectivo para poder cumplir los rangos establecidos por ley.

3.7.2 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica

Tabla III-55. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Plomo (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	0,74	0,025	0,024	0,018
Normativa (Clase A, B, C)	0,05	0,05	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-10. Concentración de Pb vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

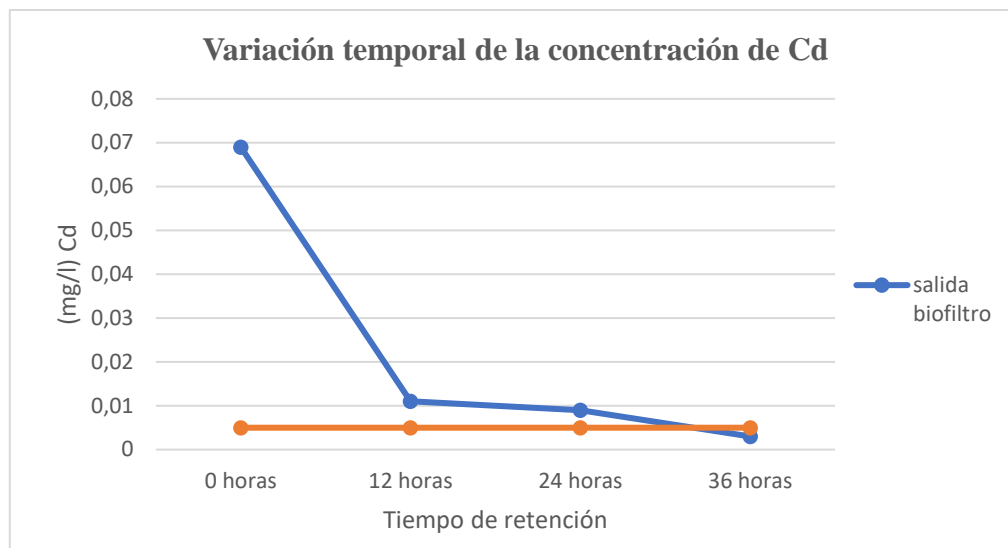
En la segunda réplica según la Tabla III-55 y figura 3-10 se observa que a partir de las 12 horas de tratamiento también se alcanza los niveles permitidos de las clases A, B y C para el Plomo, establecido en 0,05mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, por lo que se confirma que el tratamiento es efectivo.

3.7.3 Caracterización en Relación al Cadmio utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica

Tabla III-56. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Cadmio (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	0,069	0,011	0,009	0,003
Normativa (Clase A, B, C)	0,005	0,005	0,005	0,005

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-11. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

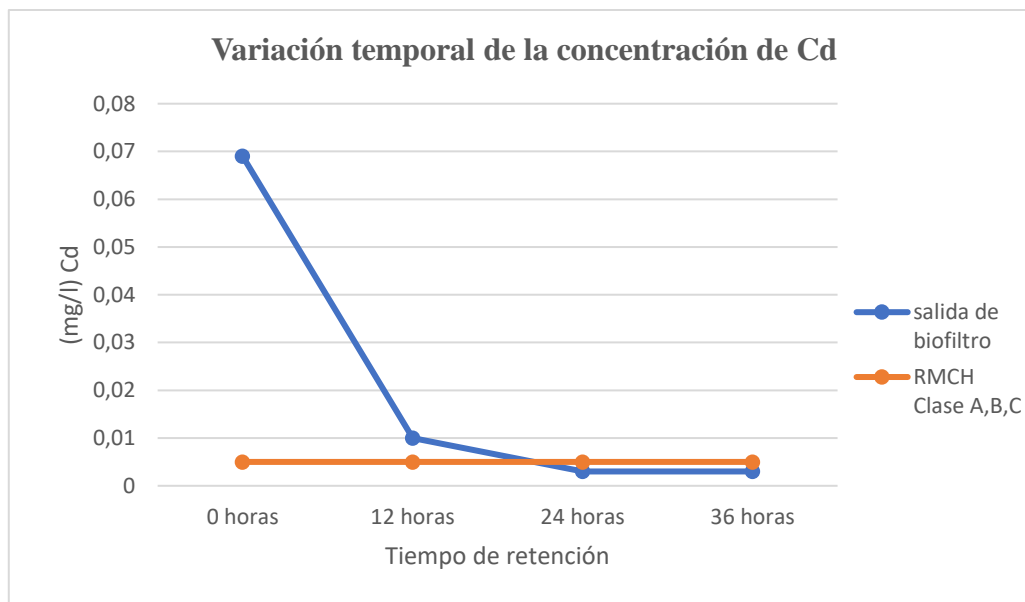
En la primera réplica según la Tabla III-56 y figura 3-11 se observa que recién a las 36 horas de tratamiento en el biofiltro se alcanza los niveles permitidos de las clases A, B y C para el Cadmio, establecido en 0,005mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, por lo que podemos indicar que para el caso del Cadmio se necesita un mayor tiempo de retención para poder cumplir los rangos establecidos por ley.

3.7.4 Caracterización en Relación al Cadmio utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica

Tabla III-57. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Cadmio (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	0,069	0,01	0,003	0,003
Normativa (Clase A, B, C)	0,005	0,005	0,005	0,005

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-12. Concentración de Cd vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

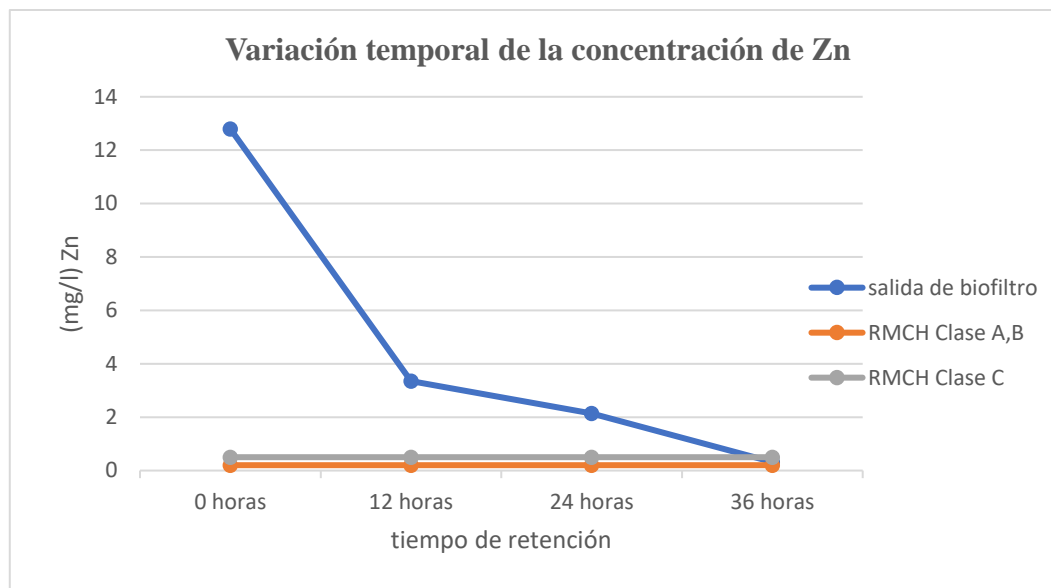
En la segunda réplica según la Tabla III-57 y figura 3-12 se observa que a diferencia de la primera réplica la concentración de las aguas a la salida del biofiltro alcanza los niveles permitidos de las clases A, B y C para el Cadmio, establecido en 0,005mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica a partir de las 24 horas de tratamiento.

3.7.5 Caracterización en Relación al Zinc utilizando 50 Plantas de Totora Primera Réplica

Tabla III-58. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Zinc (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	12,8	3,35	2,14	0,32
Normativa (Clase A, B)	0,2	0,2	0,2	0,2
Normativa (Clase C)	0,5	0,5	0,5	0,5

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-13. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Primera Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

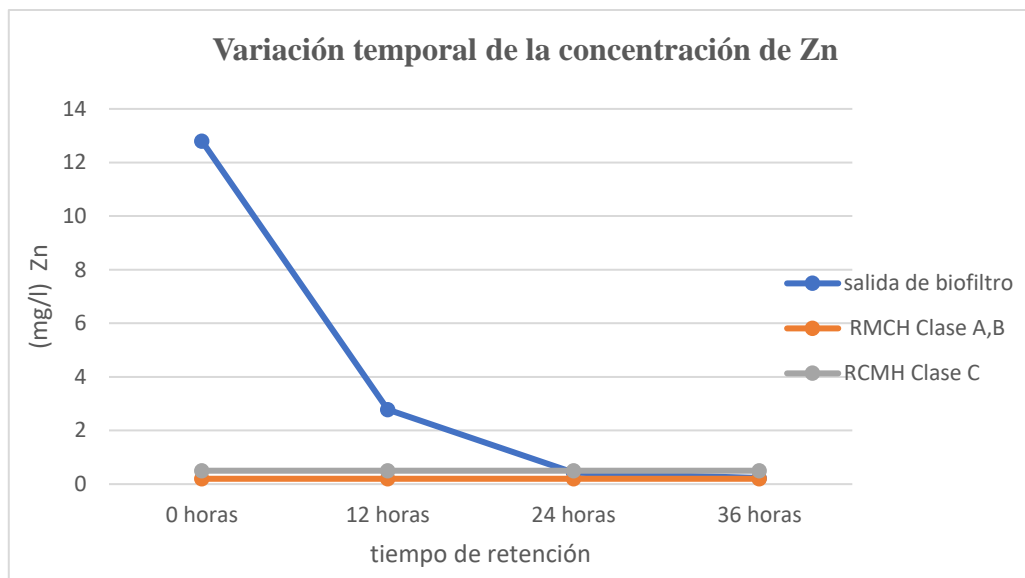
En la primera réplica según la Tabla III-58 y figura 3-13 se observa que recién a las 36 horas de tratamiento en el biofiltro se alcanza los niveles permitidos para la clase C para el Zinc, establecido en 0,5mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, por lo que podemos concluir que para el caso del Zinc se necesita un mayor tiempo de retención.

3.7.6 Caracterización en Relación al Zinc utilizando 50 Plantas de Totora Segunda Réplica

Tabla III-59. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Zinc (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	12,8	2,78	0,43	0,23
Normativa (Clase A, B)	0,2	0,2	0,2	0,2
Normativa (Clase C)	0,5	0,5	0,5	0,5

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-14. Concentración de Zn vs RMCH con 50 Plantas Segunda Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

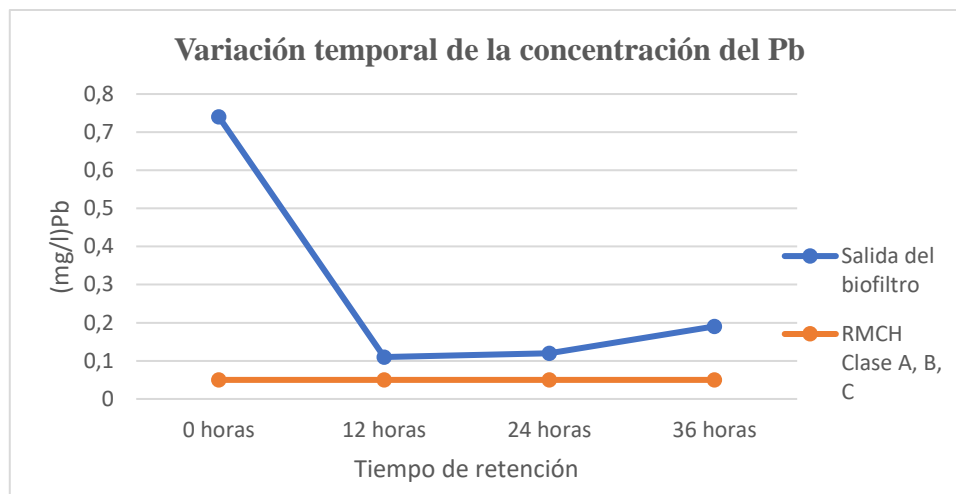
En la segunda réplica se observa en Tabla III-59 y figura 3-14 que al cabo de las 24 horas de tratamiento en el biofiltro se alcanza el nivel de la clase C para el Zinc, correspondiente a 0,5mg/l según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, a diferencia de la primera réplica cuyo tiempo de retención necesario para alcanzar el nivel de la clase C fue de 36 horas.

3.7.7 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 25 Plantas de Totora Primera Réplica

Tabla III-60. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Primera Réplica

Plomo (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
salida	0,74	0,11	0,12	0,19
normativa	0,05	0,05	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-15. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Primera Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

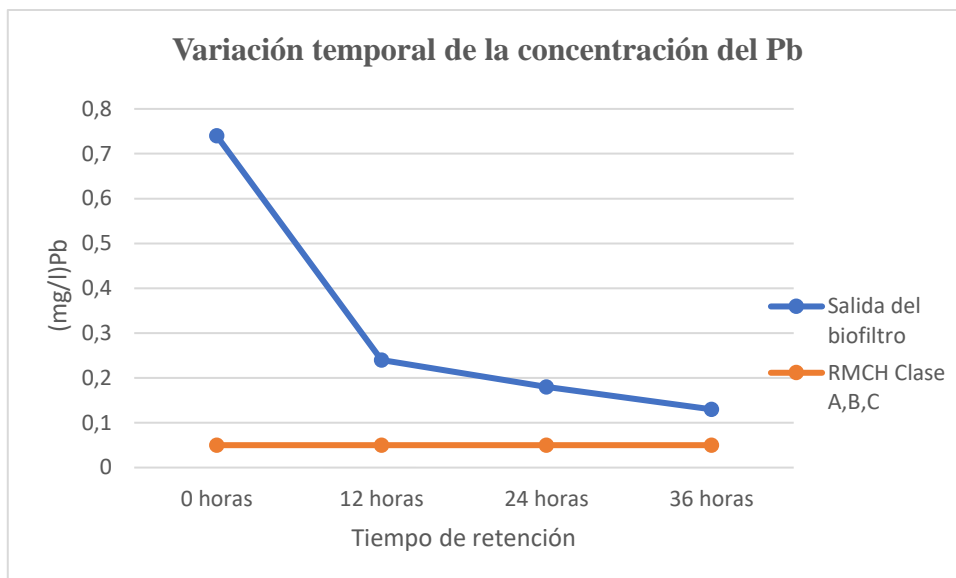
En la primera réplica según Tabla III-60 y figura 3-15 al comparar las concentraciones a la salida del biofiltro de 0,11 mg/l, 0,12 mg/l y 0,19 mg/l en los tres tiempos de estudio (12hr,24hr,36hr) con el nivel máximo permisible según la Clase A, B, C de 0,05 mg/l del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica muestra que todas estas concentraciones superan el límite establecido por la normativa. Esto indica que los resultados del tratamiento no han logrado cumplir con los estándares de calidad del agua establecidos por la normativa, a pesar de que las remociones son altas mostrando rendimientos de 87,514%, 88,973% y 86,135%.

3.7.8 Caracterización en Relación al Plomo utilizando 25 Plantas de Totora Segunda Réplica

Tabla III-61. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Segunda Réplica

Plomo (mg/l)	Tiempo de retención			
	0 horas	12 horas	24 horas	36 horas
Salida	0,74	0,24	0,18	0,13
Normativa (Clase A, B, C)	0,05	0,05	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia, 2024

Figura 3-16. Concentración de Pb vs RMCH con 25 Plantas Segunda Réplica

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la segunda réplica según Tabla III-61 y figura 3-16 al igual que en la primera réplica a pesar de tener remociones altas de 0,11 mg/l, 0,12 mg/l y 0,19 mg/l en los tres tiempos de estudio; 12hr,24hr,36hr a la salida del biofiltro, estas no son suficientes para alcanzar el límite establecido por el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica según las Clases A, B, C de 0,05mg/l. Esto indica que los resultados del tratamiento no han logrado cumplir con los estándares de calidad del agua establecidos por la normativa.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La actividad minera de años anteriores sigue provocando contaminación por metales pesados en un afluente del río Huacata. Según los análisis de laboratorio, las concentraciones de Plomo; 0,74 mg/l, Cadmio; 0,069 mg/l y Zinc; 12,8 mg/l, superan los límites permitidos por la normativa boliviana. El Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 del Medio Ambiente de Bolivia (1992) establece niveles máximos permitidos asignados a distintas clases de calidad de agua: para el Plomo, clases A, B y C (0,05 mg/l) y clase D (0,1 mg/l); para el Cadmio, todas las clases (0,005 mg/l); y para el Zinc, clases A y B (0,2 mg/l), clases C (0,5mg/l) y clase D (5 mg/l). Al realizar la caracterización del efluente de La Mina Perales en cuanto a los metales pesados Plomo, Cadmio y Zinc, se verifican los altos niveles de los mismos por lo que las aguas del efluente minero son aguas de mínima calidad y de estado crítico, no aptas para consumo humano y tampoco para riego.

- Se realiza la ejecución de la fase experimental en el sistema de tratamiento a escala laboratorio, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, con una previa adecuación y mantenimiento del biofiltro.

Esta fase experimental consta de dos partes: la primera con 50 plantas de Totorá y la segunda con 25 plantas, ambas evaluadas en tres tiempos de retención; 12 horas, 24 horas y 36 horas. Cada fase incluye dos réplicas para asegurar la fiabilidad de los resultados.

En la primera fase experimental con 50 plantas de Totorá, el sistema de tratamiento a escala de laboratorio demuestra una alta eficiencia en el tratamiento de las aguas del efluente de la Mina Perales, tal como se muestra en las siguientes tablas:

Plomo-Primera réplica con 50 plantas de Totora

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	0,74	0,038	96,097
24	0,74	0,042	97,049
36	0,74	0,032	98,962

Fuente: Elaboración propia, 2024

Plomo-Segunda réplica

Tiempo de retención (hr)	Entrada Pb (mg/l) (A)	Salida Pb (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	0,74	0,025	97,432
24	0,74	0,024	98,314
36	0,74	0,018	99,416

Fuente: Elaboración propia, 202

Cadmio-Primera réplica

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	0,069	0,011	87,884
24	0,069	0,009	93,217
36	0,069	0,003	98,957

Fuente: Elaboración propia, 2024

Cadmio-Segunda réplica

Tiempo de retención (hr)	Entrada Cd (mg/l) (A)	Salida Cd (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	0,069	0,01	88,986
24	0,069	0,003	97,739
36	0,069	0,003	98,957

Fuente: Elaboración propia, 2024

Zinc-Primera réplica

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	12,8	3,35	80,109
24	12,8	2,14	91,306
36	12,8	0,32	99,400

Fuente: Elaboración propia, 2024

Zinc-Segunda réplica

Tiempo de retención (hr)	Entrada Zn (mg/l) (A)	Salida Zn (mg/l) (C)	Rendimiento (%)
12	12,8	2,78	83,494
24	12,8	0,43	98,253
36	12,8	0,23	99,569

Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde se observa que con un tiempo de retención de 12hr existe una remoción más rápida que al cabo de las 24hr y 36hr para los tres metales Plomo, Cadmio y Zinc. Alcanzándose un mayor rendimiento a las 36hr.

Sin embargo, en la segunda fase experimental con 25 plantas, el sistema de tratamiento no es tan eficiente en comparación con la primera fase. Esta disminución en la eficiencia se debe tanto a la reducción en la cantidad de plantas como a la saturación del sistema.

En esta fase, el tratamiento es efectivo para el Plomo, logrando rendimientos promedio del 80%, 86% y 88% en los tiempos de retención de 12hr, 24hr y 36hr respectivamente. Sin embargo, para los metales Cadmio y Zinc, la saturación del sistema provoca un retorno de estos metales al medio, resultando en concentraciones finales mayores a las iniciales.

Este comportamiento se debe a que el Plomo al tener un radio iónico mayor, es decir una mayor superficie de contacto se adhiere primero a la superficie de la Totora quedando menos espacio disponible para el Cadmio y Zinc.

Por otro lado, el estudio demuestra que a mayor densidad de plantas existe una mayor remoción de metales pesados Plomo, Cadmio y Zinc.

- El presente estudio demuestra que la Totorá (*Typha Domingensis*) es altamente eficiente en la remoción de metales pesados como Plomo, Cadmio y Zinc del agua, alcanzando niveles de purificación significativos. Esto se ve reflejado en los resultados de análisis de cenizas de la misma.

Sin embargo, se observa que después de aproximadamente cinco meses, la capacidad de adsorción de la Totorá se reduce debido a la saturación de los sitios activos. Para mantener la eficiencia del sistema de biofiltración, es importante realizar podas regulares de la Totorá, asegurando así que continúe proporcionando un tratamiento efectivo para las aguas contaminadas con metales pesados.

- El sustrato del biofiltro es arenoso 82,6% según análisis de clase textural, es decir tiene bajo contenido de arcillas 6,4%, por lo cual es de baja capacidad de intercambio catiónico con el agua. Lo mencionado se encuentra reflejado en los resultados de laboratorio que indica niveles de metales pesados por debajo de lo que puede detectar la técnica utilizada en el laboratorio. Únicamente se detectan ciertos niveles de Zinc ya que el mismo se encuentra en mayores concentraciones. Mientras que según el balance de materia se encuentran Plomo y Cadmio en concentraciones bajas.
- Se realiza la caracterización de las aguas a la salida del sistema de tratamiento de biofiltración en base al RMCH, donde para el caso del tratamiento de las 50 plantas para el Plomo se alcanza los niveles de la clase A, B y C al cabo de las 12hr; para el Cadmio se alcanzó los niveles de la clase A, B y C al cabo de las 24hr y para el Zinc se alcanzó los niveles de la clase C al cabo de las 24hr; sin embargo, en el tratamiento con 25 plantas, el único metal evaluado es el Plomo, ya que es el único que muestra una remoción significativa.

A pesar de alcanzar rendimientos promedios del 80%, 86% y 88% en los tiempos de retención de 12hr, 24hr y 36hr respectivamente, no se logra cumplir con los niveles establecidos por el RMCH.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio específico para encontrar el tiempo de saturación con metales pesados preciso de la Totorá y su relación con la densidad de plantas, para así poder establecer intervalos de tiempo con mayor precisión para la poda.
- Se recomienda realizar un estudio para la disposición final de la Totorá, después de la poda, ya que esta se encuentra contaminada con metales pesados por lo tanto no se le puede dar el uso común que se le da.
- Se recomienda realizar un estudio similar al estudiado, pero simulando un sistema de flujo pistón.
- Investigar el uso de diferentes tipos de sustratos en el biofiltro para mejorar la adsorción de metales pesados. Comparar materiales como arcilla, grava, y otros medios porosos para determinar cuál ofrece mejores resultados en combinación con las plantas de Totorá, además determinar cada cuanto tiempo se debe reemplazar el sustrato.
- Investigar el uso de diferentes macrófitas en la remoción de metales pesados para determinar cuál es la más eficaz.
- Es importante continuar con los trabajos de investigación para encontrar parámetros de diseño del proceso.