

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Evaluación de la eficiencia de la remoción de plomo en aguas
residuales del río Tarma usando *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y
Typha latifolia L. en humedales artificiales

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Erick Jhon Parra López

ASESOR

Roger Manuel Mestas Valero

Lima, Perú

2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación principalmente a Dios, por darme el soplo de vida y bendecirme para lograr terminar una de mis metas en mi formación personal y profesional. A mi madre por ser la mujer más importante en mi vida, pilar fundamental, brindándome su apoyo incondicional y mucho amor para continuar día a día. A mis hermanos, porque me ayudaron en mi orientación, enseñándome y aconsejándome, para estar listo en situaciones de la vida. Y por último a mis amigos por darme fuerzas emotivas para lograr este trabajo que tomó mucha dedicación.

A todos decirles sinceramente gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por esta vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mi madre, Elsa Luz López Montalvo, por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me inculcaste. Así mismo, a mi madre que en paz descansa Tania Luz Parra López, por ser la progenitora de mi vida, por saber orientarme y guiarme en mi niñez, y por enseñarme a estar preparado para afrontar los obstáculos en esta vida.

Agradezco a mis docentes de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|------|
| Índice general | iv |
| Índice de tablas | vi |
| Índice de figuras | vii |
| Índice de apéndices | viii |
| Resumen | ix |
| Abstract | x |
| Introducción..... | 1 |
| Objetivos | 3 |
| CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1. Antecedentes | 4 |
| 1.2. Bases teóricas especializadas | 8 |
| 1.2.1. Humedal artificial | 8 |
| 1.2.2. Tipos de humedales artificiales | 9 |
| 1.2.3. Potencialidades de los humedales | 14 |
| 1.2.4. Sistemas acuáticos | 15 |
| 1.2.5. Vegetación | 16 |
| 1.2.6. Aguas residuales | 19 |
| 1.2.7. Parámetros físicos-químicos | 22 |
| CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS | 24 |
| 2.1. Materiales..... | 24 |
| 2.1.1. Material biológico..... | 24 |
| 2.1.2. Material para la preparacion de los humedales artificiales | 24 |
| 2.1.3. Materiales de laboratorio. | 24 |
| 2.1.4. Equipos..... | 24 |
| 2.2. Diseño de la investigacion | 25 |
| 2.2.1. Área de estudio | 25 |
| 2.2.2. Descripción del experimento..... | 26 |
| 2.3. Tratamientos | 29 |
| 2.4. Unidades experimentales | 31 |
| 2.5. Identificación de variables y su mensuración | 31 |

| | |
|--|----|
| 2.6. Diseño estadístico del experimento | 33 |
| 2.7. Análisis estadístico de datos | 33 |
| CAPÍTULO III: RESULTADOS | 35 |
| 3.1. Características físico-químicas iniciales de la muestra de agua del río Tarma..... | 35 |
| 3.2. Resultados del cálculo de las dimensiones y características hidrológicas del humedal artificial | 36 |
| 3.3. Cálculo de las eficiencias de reducción y remoción de los parámetros físico,químicos de las muestras obtenidas del río Tarma | 37 |
| 3.3.1. Cálculo de la eficiencia de reducción de la conductividad eléctrica | 37 |
| 3.3.2. Cálculo de las eficiencias de remoción del nitrógeno total | 39 |
| 3.3.3. Cálculo de las eficiencias de remoción de fósforo total | 41 |
| 3.3.4. Cálculo de las eficiencias de reducción del DBO ₅ | 43 |
| 3.3.5. Cálculo de las eficiencias de remoción de plomo | 45 |
| 3.3.6. Variación del pH en los tratamientos | 47 |
| CAPÍTULO IV: DISCUSIONES | 49 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES | 54 |
| CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES | 55 |
| REFERENCIAS | 56 |
| TERMINOLOGÍA | 63 |
| APÉNDICES | 65 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. <i>Características típicas de los medios para el diseño de humedales artificiales subsuperficiales</i> | 27 |
| Tabla 2. <i>Volumen de los materiales para cada humedal artificial</i> | 27 |
| Tabla 3. <i>Descripción de los tratamientos y del control en base al humedal artificial (Ha), las plantas H. bonariensis y T. latifolia más el agua residual</i> | 29 |
| Tabla 4. <i>Mensuración de parámetros físicos-químicos</i> | 31 |
| Tabla 5. <i>Promedio de los resultados de los análisis físico - químico de la muestra de agua del río Tarma (promedio ± desviación estándar)</i> | 35 |
| Tabla 6. <i>Cálculo de las dimensiones del humedal artificial</i> | 36 |
| Tabla 7. <i>Valores de la eficiencia de la reducción de la conductividad (%) en los tratamientos y a distintas horas</i> | 38 |
| Tabla 8. <i>Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de la reducción de la conductividad en los tratamientos</i> | 39 |
| Tabla 9. <i>Valores de la eficiencia de la remoción del nitrógeno total (%) en los tratamientos y a distintas horas</i> | 40 |
| Tabla 10. <i>Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del nitrógeno total en los tratamientos</i> | 41 |
| Tabla 11. <i>Valores de la eficiencia de la remoción del fósforo total (%) en los tratamientos y a distintas horas</i> | 42 |
| Tabla 12. <i>Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del fósforo total en los tratamientos</i> | 43 |
| Tabla 13. <i>Valores de la eficiencia de la reducción de la DBO5 (%) en los tratamientos y a distintas horas</i> | 44 |
| Tabla 14. <i>Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de reducción de la DBO5 en los tratamientos</i> | 45 |
| Tabla 15. <i>Valores de la eficiencia de la remoción de plomo (%) en los tratamientos y a distintas horas</i> | 46 |
| Tabla 16. <i>Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del plomo en los tratamientos y sus horas</i> | 47 |
| Tabla 17. <i>Valores del pH en los tratamientos y el control a las distintas horas evaluadas</i> | 48 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| <i>Figura 1.</i> Esquema del diseño de un humedal de flujo superficial | 10 |
| <i>Figura 2.</i> Esquema del diseño de un humedal de flujo subsuperficial | 11 |
| <i>Figura 3.</i> Esquema de un humedal artificial con especies flotantes | 15 |
| <i>Figura 4.</i> <i>Hydrocotyle bonariensis</i> Lam. | 18 |
| <i>Figura 5.</i> Morfología de <i>Typha angustifolia</i> | 19 |
| <i>Figura 6.</i> Ubicación de la toma de muestra del río Tarma en la ciudad de Tarma | 25 |
| <i>Figura 7.</i> Esquema general del humedal artificial de Flujo Subsuperficial | 30 |
| <i>Figura 8.</i> Diseño experimental de la investigación | 34 |

ÍNDICE DE APÉNDICES

| | Pág. |
|--|------|
| Apéndice 1. Cálculo de las dimensiones y características hidrológicas del humedal artificial | 65 |
| Apéndice 2. Prueba de Tukey de la variación de la reducción de la conductividad | 66 |
| Apéndice 3. Prueba de Tukey de la variación de la remoción del nitrógeno total | 67 |
| Apéndice 4. Prueba de Tukey de la variación de la remoción del fósforo total | 67 |
| Apéndice 5. Prueba de Tukey de la variación de la reducción de la DBO ₅ | 68 |
| Apéndice 6. Prueba de Tukey de la variación de la remoción del plomo | 68 |
| Apéndice 7. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua (Decreto Supremo N° 004-2017): Parámetros fisicoquímicos para la CATEGORÍA 4 | 69 |
| Apéndice 8. Registro fotográfico de la investigación | 70 |

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de humedales artificiales piloto usando la *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. para la disminución de plomo de aguas residuales provenientes del río Tarma. El experimento consistió en tres tratamientos más un control, en el que se emplearon humedales de flujo subsuperficial, contruidos a escala de laboratorio, en donde se colocaron 40 plántulas de *H. bonariensis* y *T. latifolia* en forma independiente y asociada. A estos tratamientos se les determinó la eficiencia de remoción de plomo y otros parámetros fisicoquímicos tales como la conductividad eléctrica, DBO₅, pH, nitrógeno y fósforo totales. Todas ellas fueron sometidas a una evaluación máxima de 30 horas. Los resultados indicaron que el tratamiento dos (T2), conformado por el humedal artificial que contenía plantas de la especie *T. latifolia*, fue el que mostró los valores más altos de reducción de la conductividad eléctrica (50 %), nitrógeno total (90,7 %), fósforo total (80 %), DBO₅ (78,24 %) y plomo (83,12 %) evaluada a las 30 horas y con un pH promedio de 5,8. Se demuestra la viabilidad, a nivel de laboratorio, de la remoción del plomo y otros parámetros presentes en el agua residual del humedal artificial de tipo subsuperficial estudiado.

Palabras clave: Remoción de plomo, humedal artificial subsuperficial, *Hydrocotyle bonariensis* y *Typha latifolia*.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the efficiency of pilot artificial wetlands using the *Hydrocotyle bonariensis* Lam and *Typha latifolia* L. for the removal of lead from wastewater from the Tarma river. The experiment consisted of three treatments plus a control, in which subsurface flow wetlands were used, built on a laboratory scale, where they placed 40 seedlings of *H. bonariensis* and *T. latifolia* independently and associated. These treatments were determined the efficiency of removal of lead and other physicalchemical parameters such as electrical conductivity, DBO₅, pH, total nitrogen and phosphorus. All of them were subjected to a maximum evaluation of 30 hours. The results indicated that treatment two (T2), consisting of the artificial wetland that contained plants of the species *T. latifolia*, was the one that showed the highest values of reduced conductivity electric (50%), total nitrogen (90,7 %), total phosphorus (80%), DBO₅ (78,24 %) and lead (83,12 %) evaluated at 30 hours and with an average pH of 5,8. The viability, at the laboratory level, of the removal of lead and other parameters present in the residual water of the artificial subsurface wetland studied is demonstrated.

Key words: Lead removal, subsurface artificial wetland, *Hydrocotyle bonariensis* and *Typha latifolia*.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos problemas de contaminación en nuestro medio ambiente, por ello se realizan proyectos, programas y/o planes para solucionarlos, estos, con una determinada preparación, planificación, evaluación y ejecución, proporcionan una estabilidad entre el desarrollo humano y su medio ambiente.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) considera que las extracciones de agua dulce a nivel mundial son de 3,928 km³ al año. Se estima que principalmente la agricultura, mediante evaporación en tierras de cultivo irrigadas, consume el 44 % (1,716 km³ por año) de esta agua. El 56 % restante (2,212 km³ por año) es liberado al medio ambiente como aguas residuales en forma de efluentes municipales e industriales y agua de drenaje agrícola (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWPA], 2017).

La ausencia de conocimientos acerca de una gestión de recursos hídricos en las últimas décadas no solo ha permitido la contaminación de cuerpos de aguas que se utilizan para proveer de agua limpia a la población, riego de cultivos o controlar los caudales de ríos; sino también la pérdida de la biodiversidad, la paisajística y el perjuicio en el campo de la seguridad alimentaria por el uso de estas aguas residuales en los alimentos provenientes del sector agrícola.

Actualmente, el recurso hídrico en el distrito de Tarma no presenta una gestión adecuada por parte de la autoridad local, puesto que no existe una planta de tratamiento de aguas residuales. Además, en las aguas del río Tarma se vierten residuos sólidos, agroquímicos y metales pesados como el plomo, generando que este cuerpo de agua pierda su calidad hídrica desde sus orígenes. Por esta razón se propone la evaluación de la eficiencia de remoción del metal pesado plomo de las aguas residuales del río Tarma usando humedales artificiales.

Los humedales artificiales son una alternativa de solución para el tratamiento de aguas contaminadas, debido a su bajo costo de mantenimiento, ahorro de energía y atractivo paisajístico, por lo que son consideradas económicas, sostenibles e innovadores (Lara, 1999). El interés en el uso de los sistemas naturales está basado en la conservación de los recursos asociados con estos sistemas, como opuesto al proceso de tratamiento convencional de aguas residuales, que es intensivo respecto al uso de energía y químicos.

El uso de plantas estimula la sedimentación de sólidos suspendidos; reduce el riesgo de resuspensión y erosión; aumenta el tiempo de retención de agua superficial y mejora la reducción de nutrientes mediante absorción y almacenamiento (Brix, 1997). Sin embargo, se tiene escaso conocimiento del estudio comparativo de la actividad depuradora de aguas residuales conteniendo plomo por las plantas *Hydrocotyle bonariensis* y *Typha latifolia*.

La presente investigación propone evaluar la eficiencia de remoción del metal pesado plomo presente en las aguas del río Tarma empleando humedales artificiales con las plantas *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. de manera que este estudio sea una alternativa para disminuir la contaminación del río Tarma.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la remoción de plomo en aguas residuales del río de Tarma usando *Hydrocotyle bonariensis* Lam. y *Typha latifolia* L. en humedales artificiales.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros físico-químicos (conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo total, DBO₅, pH y plomo) de las aguas residuales provenientes del río Tarma caracterizándose al inicio y al final de las diferentes etapas de cada evaluación.
- Evaluar la eficiencia de la reducción de la conductividad eléctrica y DBO₅, y la remoción del nitrógeno total, fósforo total y plomo mediante *Hydrocotyle bonariensis* y *Typha latifolia* cultivadas individualmente y en asociación.
- Lograr el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental para las aguas del río Tarma después del tratamiento con las plantas *Hydrocotyle bonariensis* y *Typha latifolia* en humedales artificiales.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Taufikurahman *et al.* (2019) realizaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar el uso de tres plantas de humedales, *Typha angustifolia* L., *Canna indica* L. e *Hydrocotyle umbellata* L. en la fitorremediación de cromo. Esta investigación fue desarrollada en las instalaciones de la Escuela de la Ciencia y la Vida de Indonesia. La metodología consistió en la preparación de humedales artificiales el cual uso como sustrato suelo de tipo andosólico, a un pH de 5,4 en donde colocaron las plantas. Para preparar el efluente usaron $K_2Cr_2O_7$ a concentraciones de 0, 10, 30 y 50 mg/L. Las plantas fueron cosechadas el 3.^{er}, 6.^o y 9.^o día. Limpiaron muestras de plantas y todas las partes de los órganos (raíz, tallos y hojas o brotes) fueron separadas. Las muestras fueron secadas en un horno a 105 °C. Los autores calcularon los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) para cada planta. Los resultados mostraron que las tres plantas sobrevivieron hasta el noveno día. La planta con el mayor crecimiento relativo fue *C. indica*, mientras que las plantas que mostraron la mayor acumulación de cromo y factor de bioconcentración (FBC) fue *H. umbellata*. El cromo fue acumulado más en la raíz que en el brote (FT <1). La planta con mayor eficiencia en la reducción de cromo en el medio fue *T. angustifolia* (99,78 %). La eficiencia de *C. indica* y *H. umbellata* fue de 99,67 % y 86,36 %, respectivamente. Los autores concluyeron que las tres plantas mostraron un buen potencial de fitorremediación para aguas residuales que contienen cromo.

Núñez (2016) realizó una investigación que tuvo como objetivo determinar la eficiencia de remoción de las aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Esta investigación fue realizada en la localidad de Bambamarca, Perú. Parte de la metodología consistió en el diseño del humedal teniendo en cuenta el caudal y la cantidad del DBO₅ del agua residual. El humedal fue diseñado con las

medidas de 1,20 m de largo, 0,6 m de ancho, una altura de 0,6 m y una pendiente aproximada del 1 % al que se le adicionó poblaciones de la macrófita *Cyperus papyrus* L. Extrajeron muestras de agua antes y después del tratamiento en donde se evaluaron los parámetros fisicoquímicos como son el pH, OD, turbidez, conductividad eléctrica y la temperatura. Los resultados obtenidos demostraron que una alta variación del valor inicial y el final. Obtuvieron valores de eficiencia altos para la DBO y la DQO (> 96,0 %), los análisis de los nutrientes también mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$), así para el nitrógeno total obtuvieron una remoción del 78 y 88 % para el fósforo total. También obtuvieron altas eficiencias de remoción (100 %) para coliformes totales y fecales, otros resultados de parámetros como OD (61 %) y turbidez (96 %) mostraron altas diferencias significativas a las pruebas de T de Student. El autor concluyó que el humedal artificial de flujo superficial horizontal demostró una efectiva remoción en todos los parámetros analizados, llegando a presentar altas eficiencias en DBO, nitrógeno, fosforo y turbidez. Además, obtuvieron un agua residual doméstica apta para ser usada para riego.

Patiño y Zhinín (2015) realizaron una investigación y propusieron como objetivo realizar un estudio comparativo de la capacidad depuradora de contaminantes, utilizando dos especies de plantas en humedales artificiales subsuperficiales con flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tomaron aguas provenientes de la tercera laguna de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Guabo” del Cantón Santa Isabel, y se aplicó a dos unidades a escala piloto con flujo continuo. Para el análisis físico - químico del agua y determinación del porcentaje de remoción, tomaron las muestras, tanto del ingreso como de la salida de cada unidad experimental. Los resultados mostraron que el papiro fue la planta que presentó una mayor capacidad de remoción de contaminantes y con valores altos de reducción en los parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitrógeno en su forma amoniacal y en nitratos, fósforo y coliformes totales y fecales (*E. coli*). Los autores concluyeron que el carrizo retuvo mayor cantidad de sólidos, sin embargo, la especie con mayor eficiencia fue el papiro.

Tito (2015) realizó una tesis sobre el *Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguaitas Cyperus altemifolius en humedales artificiales, Urbanización Zarate – San Juan de Lurigancho, Lima*, cuyo objetivo fue determinar el

porcentaje de remoción de los contaminantes en el humedal artificial con la especie vegetal mencionada. Colectó la muestra de agua de la red de alcantarillado de una vivienda de tipo unifamiliar del sector correspondiente a la Urb. Zárate. Realizaron el monitoreo y el análisis de los parámetros fisicoquímicos para aguas siguiendo los pasos recomendados por el Ministerio de Vivienda y Construcción D.S. 003 – 2010, tuvieron en cuenta los parámetros de turbidez, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Construyeron para esto 2 humedales artificiales con similares sustratos, uno de ellos conto con la presencia de la “paraguita” *Cyperus altemifolius* y el otro conservó su forma original (este fue usado como testigo). Los resultados obtenidos en torno a estos parámetros fueron los siguientes: 97,66 % (turbiedad), 79,68 % (SST), 72,84 % (DBO5) y 76,85 % (DQO) de nivel de remoción. El autor concluyó que mediante este sistema de humedal artificial es eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas grises.

Torres *et al.* (2015) realizaron una investigación con dos especies vegetales usadas para el tratamiento de aguas residuales en la localidad de Carapongo, San Juan de Lurigancho-Lima. Este estudio tuvo como objetivo determinar la eficiencia de las dos plantas del género *Cyperus* y *Phragmites* en el tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales de flujo superficial a escala piloto, para ser usadas en riego. Los autores diseñaron el humedal siguiendo lo propuesto por Crites y Tchobanoglous (2000), con una dimensión que mantuvieron la relación de 2:1; así el humedal tuvo 60 cm de ancho, 40 cm de largo y 30 cm de alto. Analizaron los parámetros fisicoquímico iniciales al agua residual, obteniendo 270 mg/L para la DBO, 16×10^7 NMP/ml para coliformes totales, un pH a 7,8 y una turbidez de 130 UNT. Como resultado del tratamiento con los humedales se obtuvieron reducciones en la DBO de 84 %, remoción de las coliformes totales en 89 %, reducción de la turbidez en 77 % y pH en 3 %. Los autores concluyeron que el humedal presentó una alta efectividad con una remoción del 80 %, mientras que, para la determinación de eficiencia de las especies, observaron que, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. presentó un mayor valor de remoción de la turbidez y el pH y bajos valores de DBO.

Bedoya *et al.* (2014) realizaron una investigación en donde trataron aguas residuales generadas en una institución universitaria de la localidad de Antioquia, Colombia. Ellos plantearon como objetivo principal implementar un sistema de tratamiento de aguas

residuales usando un humedal artificial de flujo subsuperficial. La muestra representativa del agua fue obtenida entre las 6 y 22 horas y fueron colectadas del sistema de alcantarilla de la institución universitaria, estimaron que el caudal instantáneo del agua residual, así como evaluaciones de la eficiencia de remoción, la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química, sólidos suspendidos totales, nutrientes como nitrógeno total y fósforo, microbiológicos como la evaluación de coliformes, y algunos metales como níquel y zinc en dos humedales independientes. Las macrófitas que usaron en cada humedal fueron *Typha latifolia* y *Cyperus papyrus*. Los resultados al final del tratamiento muestran un promedio de remoción de DQO de 53,9 % con *T. latifolia* y de 47,9 % con *C. papyrus*, en términos de DBO el porcentaje de remoción fue parecida para ambas plantas y se determinaron altos valores de remoción de fósforo obtenidos con las dos plantas (97,2 % con *T. latifolia* y 95,9 % con *C. papyrus*). Los autores concluyeron que después del tratamiento ninguno de los sistemas donde fueron utilizadas las macrófitas logró obtener un efluente que pudiera abarcar lo establecido por la normativa para nitrógeno total y amoniacal en un vertimiento de aguas residuales.

Sánchez (2010) en su investigación tuvo como objetivo minimizar el impacto de las aguas residuales en el entorno natural utilizando un método de depuración de las aguas de Albarracín, España. Por metodología, utilizó humedales artificiales en un sistema de tratamiento de aguas residuales, fomentando la educación ambiental y sensibilización social en las pequeñas poblaciones, además se evaluó las condiciones climáticas y la orografía del lugar elegido para la instalación de los humedales. Los resultados finales del agua tratada por el humedal de flujo subsuperficial, mostraron una reducción en los valores de DBO (0,53 mg/l), NH₄ (7,54 mg/l), NO₃ (1,41 mg/l), NTK (9,01) y P (8,52 mg/l), cabe destacar que la especie vegetal usada en esta investigación fue el lirio *Iris pseudocorus*, especie que permitió disminuir el pH del agua dado que la planta exuda compuestos acidificantes y además liberó sustancias antibióticas, y demostró ser buena en remoción de nutrientes. El autor concluyó que los humedales artificiales eran sistemas simples de operar, con un bajo mantenimiento y nulo consumo energético, que producían escasos residuos durante su operación y con bajo impacto sonoro.

Rodríguez y Ospina (2005), en el estudio *Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del Río Bogotá, Colombia*, tuvieron como objetivo evaluar la capacidad de reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos en un humedal artificial de flujo vertical a escala laboratorio. Para realizar dicho estudio diseñaron y construyeron un humedal de flujo vertical a escala de laboratorio, el sistema de distribución de los efluentes sin tratamiento constó de 2 tanques de 20 L cada uno y presentó un sistema de drenaje hecho de acrílico en forma de placa, la cual distribuyó de manera uniforme el agua a tratar el sistema de ventilación constó de tubos que permitieron transferir gases como el oxígeno al sustrato y se colocaron las plantas de papiro. Una vez realizado esto se ejecutó el programa de operación del humedal. Tomaron muestras durante 30 días consecutivos para evaluar la capacidad de reducción. Los resultados mostraron la reducción de $DBO_5 = 37 \%$, $DQO = 10 \%$, $C^*T = 49 \%$, $ST = 16 \%$, $SST = 27 \%$, $NO_2 = 83 \%$, $NO_3 = 30 \%$. Los autores concluyeron que a escala laboratorio el humedal artificial de flujo vertical mejoraba la calidad del agua del río Bogotá a la altura del campus “Río Grande” en Cajica.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Humedal artificial

Los humedales artificiales son considerados sistemas de fitodepuración eficientes para el tratamiento de aguas residuales. El componente principal de este sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas cuyas raíces se distribuyen sobre un soporte de grava impermeabilizado. La actividad de las macrófitas posibilita una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo *et al.* 2010).

Según García *et al.* (2003), los humedales artificiales son sistemas que pueden ser usados para tratar una amplia variedad de aguas residuales:

- Aguas de uso doméstico.
- Aguas de origen industrial, que abarca actividades como la fabricación del papel, fabricación de productos químicos y farmacéuticos.
- Aguas de residuales de procedentes de extracciones mineras (relaves).

- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Aguas del tratamiento de fangos de depuradoras convencionales

Los humedales poseen mecanismos básicos que le confieren un potencial para el tratamiento de aguas residuales; logran fijar los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos logrando un tratamiento con un bajo consumo de energía y mantenimiento (Lara, 1999).

1.2.2. Tipos de humedales artificiales

En la actualidad existen diversos diseños de humedales artificiales que se han desarrollado a la par con la tecnología. Para González (2002) la variabilidad del diseño puede estar referido al sistema de flujo de agua, a plantas usadas para extraer nutrientes o metales y al tipo de sustrato usado. Otra característica es el flujo o movimiento de agua en el sistema, pudiendo ser de tipo horizontal, cuando el movimiento de las aguas fluye por la superficie paralela a la base; la de tipo vertical combina el movimiento paralelo a las paredes del sistema. Con respecto al sustrato, los sistemas más comunes llevan la combinación de grava y arena, mientras que algunas solo usan una capa de arena. En cuanto a la vegetación, tenemos las plantas emergentes con enraizamiento del sustrato, las macrófitas flotantes y las de sistemas mixtos.

En el desarrollo de los humedales artificiales se consideran tres sistemas que permiten diferenciarlos por la naturaleza de su funcionamiento tanto mecánico como biológico. El primero de ellos es el humedal de flujo superficial, este sistema es uno de los más desarrollados en el tratamiento de aguas residuales. Luego se tiene los humedales de flujo subsuperficial y los humedales con macrófitas flotantes, este último sistema presenta como vegetación a las especies flotantes como la “lechuga de agua” *Pistia stratiotes* L. o el “jacinto de agua” *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms y en algunas ocasiones también presenta especies emergentes (Delgadillo *et al.*, 2010).

Humedales de flujo superficial (FWS)

La característica principal de este sistema radica en el tipo de flujo del agua, este sistema presenta un flujo horizontal con respecto a la superficie. Este diseño trata de tener las mismas características de los humedales naturales, por lo que generalmente se diseñan a modo de estanques con su respectivo ingreso y salida del agua residual y con sus controles de paso del flujo. Este sistema presenta una profundidad promedio de 30 cm, pudiendo llegar a 1,0 m y presentar vegetación acuática. En este sistema las macrófitas usadas son abundantes y las que se usan son enraizadas al sustrato; también pueden incorporar especies acuáticas flotantes, y especies vegetales sumergidas tal como se observa en la Figura 1.

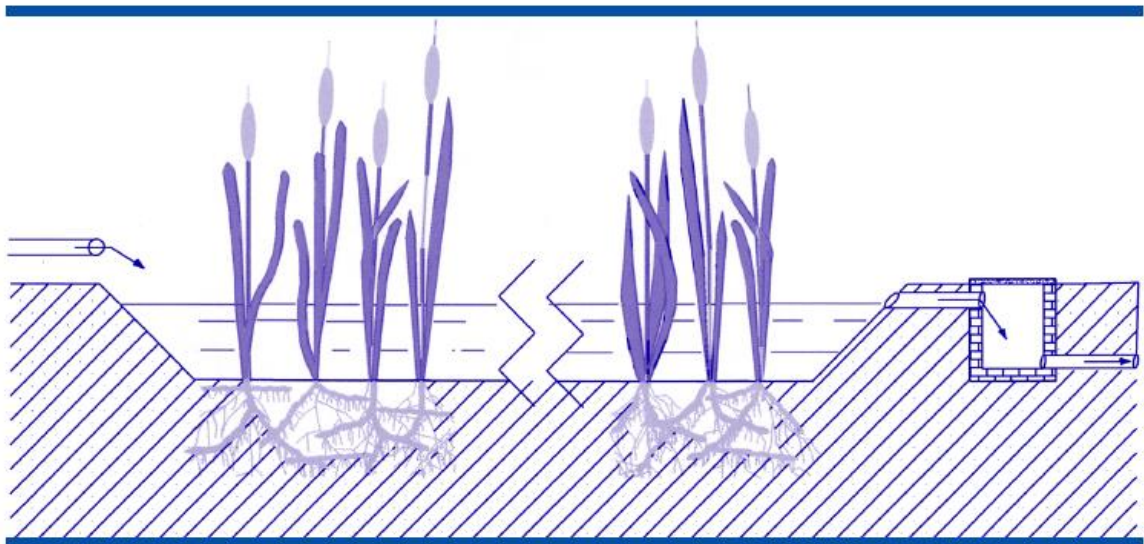


Figura 1: Esquema del diseño de un humedal de flujo superficial.

Fuente: González (2002)

Humedales de flujo subsuperficial (SsF)

Tal como se puede observar en la Figura 2, este tipo de sistemas el flujo de agua fluye por debajo de la superficie del sistema de manera muy similar a los sistemas de flujo superficial. El diseño de este humedal se asemeja al de estanques naturales y con mecanismos de control de flujo. Lo que identifica a este sistema fundamentalmente es el movimiento o circulación del agua que se realiza sobre el lecho arena o grava, de modo tal que la circulación del agua fluye a través de la zona radicular de las plantas, no observándose movimiento de agua en la superficie del humedal. El agua en el fondo del humedal puede

moverse de forma horizontal como también vertical, dependiendo de la vegetación y del sustrato. El ingreso del agua en este sistema se da por la superficie y la salida es por fondo del extremo del sistema. Algunos autores denominan a este tipo de sistemas “lecho vegetados sumergidos” por la actividad que se desarrolla a ese nivel.

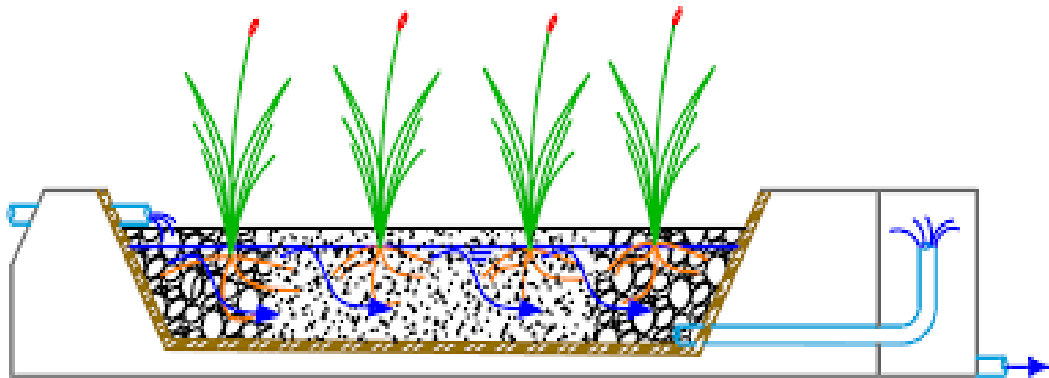


Figura 2: Esquema del diseño de un humedal de flujo Subsuperficial.

Fuente: González (2002)

Los principales componentes de los humedales construidos de flujo subsuperficial pilotos son: 1) captación y distribución de aguas, 2) tipo de vegetación y 3) medio granular (González, 2002).

Componentes del humedal artificial de flujo subsuperficial:

1. Captación y distribución de aguas

Las estructuras de la recogida y los vertidos que tendrá el sistema permitirán tener un control óptimo para el afluente a utilizar en el sistema piloto. Las funciones son la captación y repartición del agua residual al humedal gravitacional.

El agua residual utilizada en el sistema de humedal proviene de la utilización de la población en sus diferentes actividades domésticas y comunitarias, y que es recogida por una red de alcantarillado que conduce a un cuerpo de agua. La procedencia de estas aguas es el resultado de la combinación de las aguas de precipitaciones, subterráneas

o superficiales; descargas de aguas municipales; y desechos de residuos sólidos que provienen de la población (Delgadillo *et al.*, 2010).

De acuerdo a Lara (1999) uno de los componentes más importantes del diseño de humedales es el componente hidrológico, pues es el factor primario que rige el funcionamiento del humedal y por ende es decisivo en el momento de tratar las residuales. Los motivos que puedan generar el éxito o fracaso son los siguientes:

- Los cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Por el área superficial del agua y su escasa profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración principalmente
- La disposición de la cobertura vegetal en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo vías de flujo presentando un movimiento sinuoso del agua a través de la distribución de raíces y rizomas, bloqueando la exposición al viento y al sol.

2. Tipos de Vegetación

El rol de la vegetación en los sistemas tipo humedales, está determinado fundamentalmente por estructuras como las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en orgánico. Estos organismos transfieren gases como el oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno absorbido se deposita en regiones donde los microorganismos aerobios producen diversas reacciones bioquímicas (Arias, 2004).

De acuerdo a Lara (1999), la vegetación emergente en este sistema puede realizar al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Se estabiliza el sustrato y limitan la canalización del flujo de las aguas.
- Se depositan los materiales suspendidos gracias a la reducción de las velocidades de las aguas.
- Se incorporan elementos como el carbono, nutrientes y elementos traza que los incorporan a los tejidos de la planta.
- Se transfieren gases entre la capa atmosférica y la capa de sedimentos.
- La transferencia de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otras áreas dentro del sustrato.
- Estructuras como el tallo y la raíz generan espacios en donde se fijan microorganismos.

3. Medio granular

Este medio está constituido por arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se depositan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica de este medio es permitir la permeabilidad suficiente para lograr el paso del agua a través de él, para esto se utiliza suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente (Delgadillo *et al.*, 2010).

La importancia del sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales radica principalmente en:

- Ser sistemas que permiten generar hábitats para muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- Presentar una alta permeabilidad del sustrato que permite un flujo continuo del agua a través del humedal.
- Que muchas transformaciones químicas y biológicas, principalmente microbianas, tiene lugar en este sistema.
- Lograr proporcionar lugares de almacenamiento para muchos contaminantes.

- Lograr reacciones biológicas importantes con la finalidad de obtener fuentes de carbono que se traduce en energía vital para los organismos presentes en el humedal (Lara, 1999).

1.2.3. Potencialidades de los humedales

Eficiencia

El humedal artificial piloto presenta un diseño económico y eficiente, que consiste en una cubierta de grava y arena; plantaciones con macrófitas, en este caso con el papiro y la espadaña; y no cuenta con una membrana impermeable, ya que es un diseño piloto en un recipiente de vidrio trapezoidales y no tienen contacto con el suelo.

La eficiencia de estos sistemas, en cuanto a su remoción de contaminantes en un cuerpo de agua contaminado generado por las viviendas de la población, dependerá de las propiedades de la vegetación a utilizar y el caudal controlado que será utilizado en el sistema.

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo por medio de un tubo y recogida por otro tubo de drenaje en la parte opuesta inferior del sistema de humedal artificial. El agua residual se trata a medida que fluye verticalmente a través de las interacciones con la vegetación y el medio granular. La profundidad y la pendiente del diseño son establecidas según el caudal que ingresa al humedal artificial (Medina y López, 2015).

Ventajas

En los humedales artificiales las ventajas que se pueden encontrar son múltiples, ya que estos sistemas tienen componentes y recursos de fácil accesibilidad. Una de las principales ventajas es la capacidad de reducción de contaminantes en aguas residuales, puesto que en el sistema sus componentes interactúan haciendo posible la reducción de contaminantes. Otra de las ventajas es el reciclaje y la reutilización del agua contaminada,

dado que este recurso puede ser captado, luego del tratamiento, para usarla en distintas actividades por el hombre, como, por ejemplo: en el riego de plantas ornamentales y cultivos. Por último, presenta el sistema un impacto positivo paisajístico por las especies vegetativas que se utilizan (Medina y López, 2015).

1.2.4. Sistemas acuáticos

Para González (2002) estos sistemas deben de presentar una cobertura vegetal constituida por plantas flotantes sobre la superficie del agua contenida en el humedal. Otra condición importante está referido a la comunicación en serie que deben de presentar los estanques o embalses y además de mantener un aislamiento del medio. Su diseño no incluye sustrato en el fondo del estanque o canal y exigen la remoción periódica de parte de las plantas.

Los sistemas con especies flotantes se pueden observar en la Figura 3 y consisten en estanques o canales de profundidad variable (0,4 a 1,5 m), alimentados, en los que se desarrollan las plantas que flotan de modo natural. Para este tipo de sistemas las especies flotantes más comunes son “jacinto de agua” *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms y “lenteja de agua” *Lemna* spp. Existen tres mecanismos importantes que permiten el retiro de contaminantes del agua y son:

- La precipitación de sólidos.
- La captación de nutrientes por las plantas presentes en el agua y su posterior retiro.
- Descomposición de la materia orgánica y detritus por organismos simbioses asociados a las plantas y con actividad aeróbica, anaeróbica y/o facultativa.

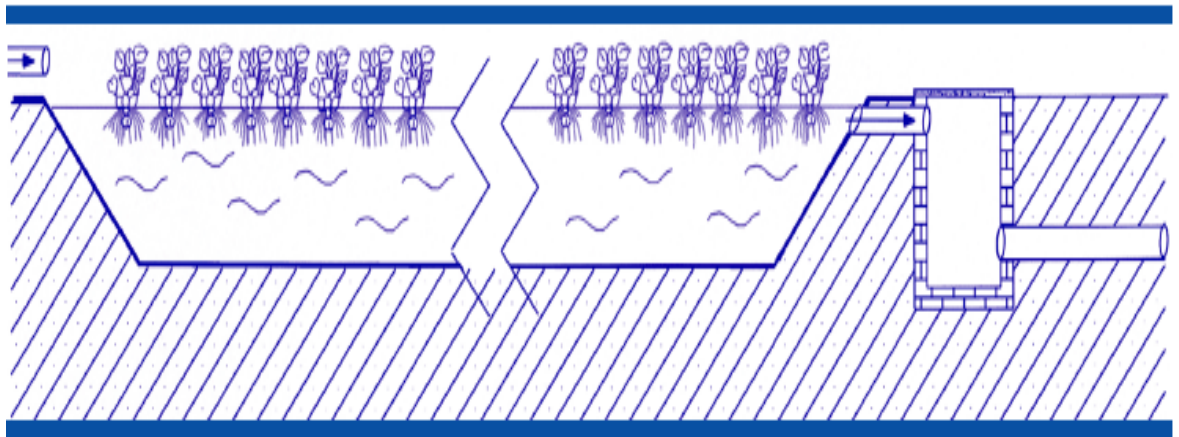


Figura 3: Esquema de un humedal artificial con especies flotantes.

Fuente: González (2002).

1.2.5. Vegetación

Las plantas emergentes que van a constituir los humedales artificiales contribuyen al tratamiento del agua residual de varias maneras:

- a. La vegetación que se desarrolla en los humedales de flujo subsuperficial actúan como canales de transporte de gases (CO_2 , metano, entre otros.) hacia la atmósfera y gases como el oxígeno hacia el sustrato. Se sabe que las plantas aportan oxígeno a sus raíces con la finalidad de mantener la aerobiosis necesaria, con esto permite la simbiosis con microorganismos que aportan a la nutrición de la planta. Las condiciones de la planta van a influir en el aporte de oxígeno al sistema; así el tamaño, la especie, la edad y la estación del año son parte de esas condiciones. Muchos autores han establecido que el requerimiento de oxígeno del sistema, que está influenciado por el tipo de agua residual, va a generar que la planta aporte este gas para contrarrestar su falta o reduzca su emisión para nivelar algún exceso de ella. Últimas investigaciones corroboran esta actividad y han establecido rangos de oxígeno que se transportan por el lecho del sistema (Peña y Infante, 2012).
- b. Las plantas o macrófitas ayudan a mantener estable el cauce de las aguas en el sistema, además son responsables de las variaciones de la conductividad

hidráulica; así como favorecer en la sedimentación de sólidos y lentificar la velocidad del agua. Estas características permiten incrementar el contacto entre la vegetación y el agua lo que repercute en una mejor predisposición de estos organismos en captar nutrientes u otro contaminante (Petticrew y Kalff, 1992; citado por Peña y Infante, 2012).

- c. La raíz es el órgano vegetal que influye fuertemente en el tratamiento de aguas residuales, dado que alrededor de ella se forma un cosmos donde se acumula elementos químicos presentes en el agua y que permiten realizar una serie de reacciones químicas. Esto se justifica por la extracción de nutrientes y otros componentes por las plantas que permiten el consumo y agotamiento de las sustancias presentes en el agua residual (Alcántara, 2016).
- d. Compactan el lecho o sustrato dotándole de estabilidad (González, 2010).
- e. Las raíces permiten la fijación de los microorganismos a su superficie. Esto genera un incremento en el área de la biopelícula formada (González, 2010).
- f. Permiten estabilizar las fluctuaciones de la temperatura dentro del humedal, así se evita cambios bruscos que afectarían negativamente el sistema (García *et al.*, 2003; Brix, 1994).
- g. Cuando se mueren y se deterioran generan restos de vegetación.

Las especies vegetativas usadas en la investigación fueron:

1. *Hydrocotyle bonariensis* Lam

La especie *Hydrocotyle bonariensis* se encuentra ampliamente distribuida en el mundo con más de 130 variedades que presentan notables cambios morfológicos, no solo entre especies sino también dentro de ellas (Nicolas y Plunkett, 2009). Se reconoce principalmente por presentar hierbas perennes, con tallos radicales en los nudos, hojas generalmente peltadas, estípulas y umbelas multifloras simples o prolíferas; sus frutos son comprimidos lateralmente y es de tipo esquizocarpo orbicular de unos 2 mm, con 2 mericarpos costillados,

con 5 costillas, sin carpóforos además presentan semillas con endospermo leñoso. La primera clasificación donde se destacó los caracteres morfológicos de la *Hydrocotyle* sp. fue realizado por Tournefort en 1694, cuando incluyó al género por primera vez dentro de las Umbelíferas, teniendo como base caracteres de la inflorescencia, la flor y la morfología del fruto (Arenas y García, 1993).



Figura 4: *Hydrocotyle bonariensis* Lam.

Fuente: Ruiz y Pavón (1798).

2. *Typha latifolia* L.

Según lo descrito por Smith (2010, p. 22):

La “espadaña” *Typha latifolia*, pertenece a la familia de las Typhaceae son plantas herbáceas perennes rizomatosas (con tallo subterráneo de varias yemas, que crece de manera horizontal emitiendo raíces y nuevos brotes), con largas hojas verdes y flores de forma de salchicha en su parte apical.

En su estado adulto alcanzan alturas entre 3,5 – 4,0 m. Las plantas de la especie *latifolia* poseen una inflorescencia que no presenta separación entre el polen y el pistilo.

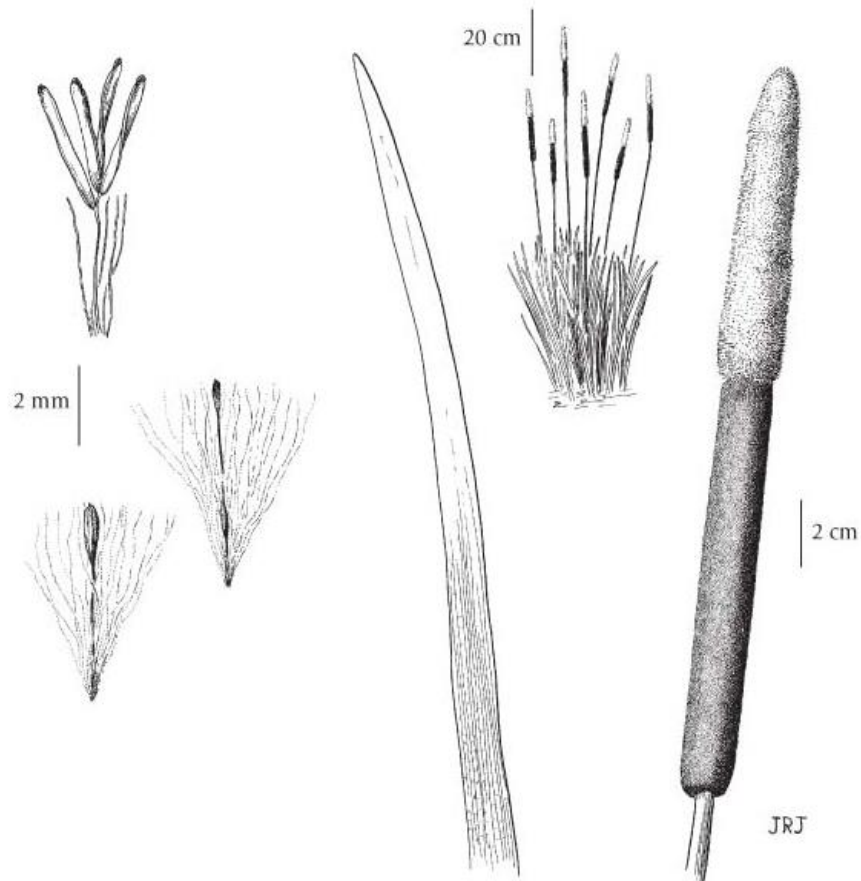


Figura 5: Morfología de Typha angustifolia.

Fuente: Watson y Dallwitz (1992).

1.2.6. Aguas residuales

El agua es una sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, líquida, inodora, insípida e incolora. Es el componente más abundante de la superficie terrestre y, más o menos puro, forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares; es parte constituyente de todos los organismos vivos y aparece en compuestos naturales (Real Academia Española, 2001).

Las aguas residuales son líquidos provenientes de viviendas y edificios comerciales e institucionales, que son conducidos por medio de una red de drenaje hacia una planta de tratamiento, preferiblemente (Salazar, 2003).

Características de las aguas residuales

Dependiendo de su fuente Obuobie *et al.* (2006) menciona las características generales de estas aguas.

Las aguas residuales industriales con características de aguas residuales municipales o domésticas se pueden descargar juntas. Las aguas residuales industriales pueden requerir algún tratamiento previo si deben descargarse con aguas residuales domésticas. Las características de las aguas residuales varían de industria a industria y, por lo tanto, tendría diferentes procesos de tratamiento. En general, los contaminantes en las aguas residuales se clasifican en físicos, químicos y biológicos e incluye:

Físico:

- La conductividad eléctrica (CE) indica el contenido de sal.
- El total de sólidos disueltos (TDS) comprende sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica disuelta en agua.
- Los sólidos suspendidos (SS) comprenden partículas sólidas suspendidas (pero no disueltas) en agua.

Químico:

- El oxígeno disuelto (OD) indica la cantidad de oxígeno en el agua.
- La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) indica la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos aerobios para descomponer la materia orgánica en una muestra de agua en un período de tiempo definido.
- La demanda química de oxígeno (DQO) indica el equivalente de oxígeno de la materia orgánica contenido de una muestra que es susceptible a la oxidación por un fuerte oxidante químico.

Biológico:

- Compuesto orgánico total (TOC).
- $\text{NH}_4\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$ muestran nitrógeno disuelto (amonio y nitrato, respectivamente).
- El nitrógeno total de Kjeldhal es una medida del nitrógeno amoniacal unido orgánicamente.
- Total-P refleja la cantidad de todas las formas de fósforo en una muestra biológica.
- Los coliformes totales (TC) abarcan los coliformes fecales y microorganismos del suelo común.
- Los coliformes fecales (FC) son un indicador de contaminación del agua con materia fecal.
- El análisis de helmintos busca huevos de gusanos en el agua.

Niveles de tratamiento de aguas residuales

Hay tres niveles generales de tratamiento: primario, secundario y terciario. Algunas veces, el tratamiento preliminar precede al tratamiento primario.

Tratamiento preliminar: elimina gruesos suspendidos y granos. Estos pueden ser eliminados por cribado y cámaras de arena respectivamente. Esto mejora la operación y el mantenimiento de unidades de tratamiento posteriores. Los dispositivos de medición de flujo, a menudo canales de onda estacionaria, son necesario en esta etapa de tratamiento (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2006).

El tratamiento primario: elimina los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables por sedimentación y materiales flotantes (escoria) por roce. Hasta 50 % de DBO_5 , 70 % de sólidos en suspensión y el 65 % de la grasa y el aceite se pueden eliminar en esta etapa. Algo de nitrógeno orgánico, orgánico El fósforo y los metales pesados también se eliminan. Los componentes coloidales y disueltos, sin embargo, no se elimina en esta etapa. El efluente de las unidades de sedimentación primaria es denominado efluente primario (FAO, 2006).

El tratamiento secundario: es el tratamiento adicional del efluente primario para eliminar los residuos orgánicos y sólidos en suspensión. También la materia orgánica disuelta y coloidal biodegradable es eliminado mediante procesos de tratamiento biológico aeróbico. La eliminación de materia orgánica es cuando compuestos de nitrógeno y compuestos de fósforo y microorganismos patógenos son removidos. El tratamiento puede hacerse mecánicamente como en filtros de goteo, etc.

El tratamiento terciario o tratamiento avanzado: se emplea cuando los componentes específicos de aguas residuales que no puede eliminarse mediante tratamiento secundario. Tratamiento anticipado que elimina cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados, biodegradables orgánicos, bacterias y virus. Se pueden usar dos métodos de manera efectiva para filtrar a efluentes secundarios: filtro de arena tradicional (o medio similar) y los nuevos materiales de membrana. Se han mejorado los filtros, y tanto los filtros como las membranas también eliminan los helmintos (FAO, 2006).

1.2.7. Parámetros físicos–químicos

a. Conductividad eléctrica

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar la corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como la temperatura de la medición. La unidad del parámetro es uS/cm (unidades Siemens por centímetro) y el parámetro tiene un valor mínimo de 2500 (Rodríguez, 2009).

b. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

El DBO₅ es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua. Esta prueba se realiza durante un periodo de 5 días a 20 °C, por lo que se expresa como DBO₅. La unidad del parámetro es mg/L (miligramo por litro) y el parámetro tiene un valor máximo de 15 (Raffo y Ruíz, 2014).

c. Demanda química de oxígeno (DQO)

El DQO, mide la cantidad de materia orgánica del agua, mediante la determinación del oxígeno necesario para oxidarla. Este parámetro no puede ser menor que la DBO, ya que es mayor la cantidad de sustancias oxidables por vía química que por vía biológica. La unidad del parámetro es mg/L (miligramo por litro), y el parámetro tiene un valor máximo de 40 (Mejía y Pérez, 2016).

d. Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es un parámetro que expresa el carácter ácido o básico del agua u otra sustancia líquida, determinada por el número de iones hidrógeno presente. La importancia de este parámetro se fundamenta al representar los niveles óptimos de desarrollo para un gran número de sistemas orgánicos, y además la formación y actividad de complejos inorgánicos. Por ejemplo: puede influir fuertemente en la vida acuática cuyo rango idóneo del intervalo de valor es de 6,5 – 8,5 (Rodríguez, 2009).

e. Temperatura

Este parámetro influye en las reacciones químicas y su cinética. La solubilidad de los gases (oxígeno disuelto) disminuye al aumentar la temperatura. Generalmente, el aumento de este parámetro produce un aumento de la actividad metabólica de los microorganismos, es decir, un aumento en la velocidad de consumo de oxígeno del cuerpo de agua hasta que se agote completamente. La unidad del parámetro, grado Celsius (°C) y el parámetro tienen una variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada (Rodríguez, 2009).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

2.1.1. Material biológico

Se empleó plántulas de *Hydrocotyle bonariensis* y *Typha latifolia* adquiridas del vivero Agro-oriente SAC.

2.1.2. Material para la preparación de los humedales artificiales

- Se empleó cajas de tecnopor de 0,80 m²
- Tanque de fibra de vidrio de 1100 litros
- Mangueras de 3 metros de largo y $\frac{3}{4}$ de diámetro

2.1.3 Materiales de laboratorio

- Un beacker de 100 ml, una probeta de 100 ml y embudos de plástico.
- Pipetas de plástico (1,0 ml y 5,0 ml).
- Kits fotométricos para la determinación de plomo, fósforo y de nitrógeno total.

2.1.4. Equipos

- Un fotómetro WTW.
- Una incubadora Kert-lab.
- Un horno IMACO HE900.
- Un Multiparámetro portátil HANNA.
- Una balanza de precisión modelo Digital Precisión.

2.2. Diseño de la investigación

La presente investigación presenta un enfoque de tipo cuantitativo, en donde se recolectaron datos procedentes de los resultados y que sirvieron para probar la hipótesis propuesta. Así mismo, se realizó un diseño metodológico de tipo experimental en donde se evaluó la actividad de remoción de los contaminantes a través de los humedales artificiales propuestos (Hernández *et al.*, 2010).

2.2.1. Área de estudio

Las muestras para la presente investigación fueron aguas residuales del río Tarma localizados en el distrito de Tarma ($11^{\circ} 23' 45.29''$ S - $75^{\circ}41' 15.94''$ O) (Figura 6), dicha ciudad se encuentra ubicado en ambos márgenes de la carretera central con dirección a la Selva Central, en la provincia de Tarma, departamento de Junín - Perú, a 3053 msnm.



Figura 6. Ubicación de la toma de muestra del río Tarma en la ciudad de Tarma.

Fuente: Google maps (2020).

2.2.2. Descripción del experimento

a. Toma de muestra del agua residual del río Tarma

Las muestras de aguas residuales fueron tomadas de aguas residuales liberadas al río Tarma, localizados en el distrito de Tarma ($11^{\circ} 23' 45.29''$ S - $75^{\circ} 41' 15.94''$ O). Durante la toma de muestra se tuvo en cuenta las características que presentó el entorno del cuerpo de agua en la zona de muestreo. Se acondicionaron galoneras de plástico de primer uso para el traslado de las muestras de agua, los envases no contenían preservantes. Posteriormente se procedió al etiquetado y traslado de las galoneras herméticamente a los laboratorios de la UCSS para luego ser almacenadas a 4°C hasta su uso. El volumen total colectado fue de 250,0 litros. El procedimiento para la toma de muestras fue el propuesto por el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales tal como se menciona en la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2016).

b. Diseño de las unidades de biofiltración

Cuatro unidades de biofiltración fueron usadas para la presente investigación, estas estuvieron constituidas por cajas de tecnopor de $0,8\text{ m}^2$ de ancho por 0,4 m de fondo y 1,0 de largo y cuyos cálculos para de medidas se encuentran en el Apéndice 1. Además, se utilizó un tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ cm de diámetro para el intercambio de líquidos, estas unidades de biofiltración fueron ubicadas en el invernáculo de la UCSS-Lima.

Se consideraron para el diseño de las unidades de biofiltración los siguientes elementos:

Estratos

Los estratos o medios para el diseño de las unidades de biofiltración (humedales artificiales) fueron considerados según Lara (1999) y se hallan detallados en la Tabla 1.

Tabla 1

Características típicas de los medios para el diseño de humedales artificiales subsuperficiales

| Tipo de material | Tamaño Efectivo (mm) | Porosidad (%) | Conductividad |
|------------------|----------------------|---------------|---------------|
| Arena Fina | 2 | 28-32 | 100-1000 |
| Arena Gruesa | 8 | 30-35 | 500-5000 |
| Grava Fina | 16 | 35-38 | 1000-10000 |
| Grava media | 32 | 36-40 | 10000-50000 |
| Roca gruesa | 128 | 38-45 | 50000-250000 |

Fuente: (Lara, 1999).

Volúmenes

Se determinó el volumen de los materiales utilizados en el piloto según Lara (1999), se tomaron en cuenta específicamente la capacidad volumétrica del humedal, el tamaño del material y las proporciones de los materiales usados, tal como se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Volumen de los materiales para cada humedal artificial

| Capa | Material | Tamaño efectivo (mm) | Volumen (m ³) |
|------|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | ARENA FINA | 0,5 | 0,022 |
| 2 | ARENA GRUESA | 2 | 0,022 |
| 3 | PIEDRA CHANCADA | 36 | 0,066 |

Fuente: Elaboración propia.

Se usó la siguiente fórmula según Lara (1999) para determinar la relación largo - ancho de un humedal en donde esta no excedió la relación 5:1, y se denota de la siguiente manera:

$$W = \frac{1}{Y} * \left[\frac{(Q)(As)}{(m)(Ks)} \right]^{0.5}$$

Donde:

W = Ancho del Humedal

Q = Caudal / N° de Unidades

m = Pendiente del Lecho

Ks = Conductividad Hidráulica.

As = Área Superficial / N° de Unidades

Y= profundidad

El largo del humedal es:

$$L = \frac{As}{W}$$

Donde:

L = Largo del Humedal

As = Área Superficial / N° de Unidades

W = Ancho del Humedal

Cálculo de caudal de descarga

Para realizar el cálculo del caudal del efluente, se utilizó el método del aforamiento propuesto por Lara (1999), para lo cual se registró el tiempo de llenado de un recipiente de cuatro litros, se realizó cinco aforamientos en la mañana y cinco aforamientos en la tarde, durante un mes; de esta manera se calculó el caudal Q promedio por día en m³ /día y que esta denotado por la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q = caudal

v = volumen

t = tiempo

Tiempo de retención Hidráulica

Para obtener el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) del humedal artificial se aplicó la siguiente fórmula (Lara, 1999):

$$TRH = \frac{(As)(Y)(n)}{Q}$$

Donde:

TRH = Tiempo de Retención Hidráulica

As: Área superficial

Y: Profundidad de agua del humedal

n: Porosidad del medio

Q: Flujo promedio a través del humedal

2.3. Tratamientos

Para la presente investigación las condiciones están referidas a tres tratamientos y un control, los cuales se describen en la Tabla 3.

Tabla 3

Descripción de los tratamientos y del control en base al humedal artificial (Ha), las plantas H. bonariensis y T. latifolia más el agua residual

| Tratamientos | Composición |
|--------------|--|
| T1 | Ha + <i>H. bonariensis</i> + Agua residual |
| T2 | Ha + <i>T. latifolia</i> + Agua residual |
| T3 | Ha + <i>H. bonariensis</i> + <i>T. latifolia</i> + Agua residual |
| Control | Ha + Agua residual |

Fuente: Elaboración propia.

El tratamiento 1 (T1) estuvo constituido por el biofiltro más 40 plántulas de *H. bonariensis* y el agua residual extraída del río Tarma.

El tratamiento 2 (T2) estuvo constituido por el biofiltro más 40 plántulas de *T. latifolia* y el agua residual extraída del río Tarma.

El tratamiento 3 (T3) estuvo constituido por el biofiltro más 20 plántulas de *H. bonariensis* y 20 plántulas de *T. latifolia* más el agua residual extraída del río Tarma.

El tratamiento control (CONTROL) estuvo constituido por el biofiltro más el agua residual extraída del río Tarma. A estos tratamientos se les determinó la remoción de plomo a través de la precipitación natural. Todas ellas fueron sometidas a una evaluación cada 5 horas hasta la hora 30 según lo propuesto por Bedoya *et al.* (2014). En la Figura 7 se observa el esquema general del humedal artificial propuesto.

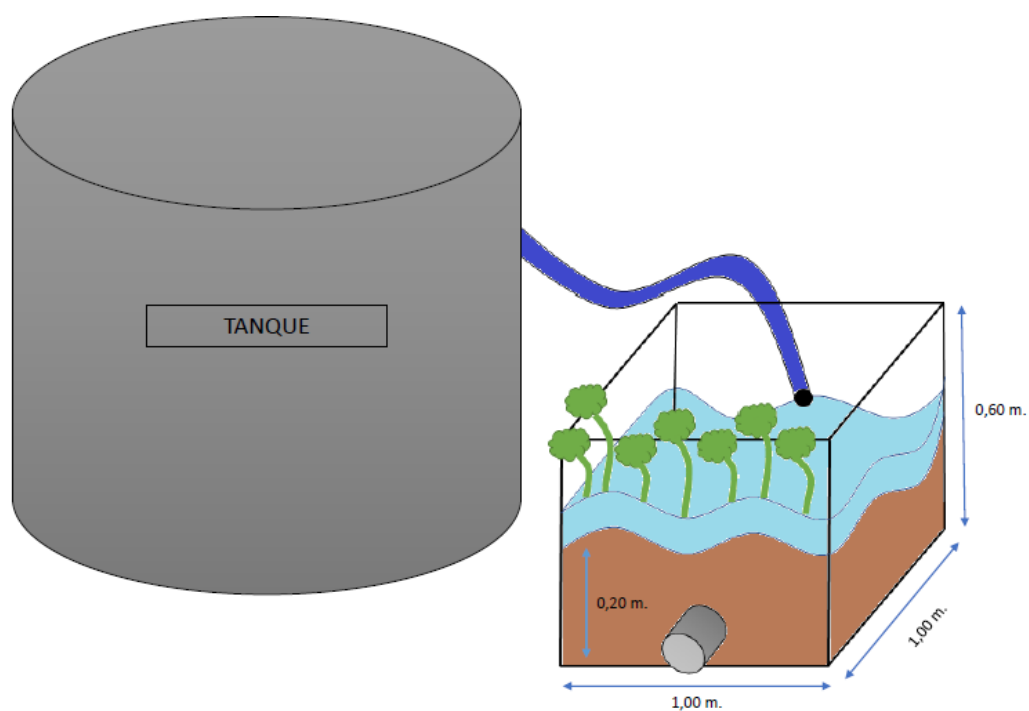


Figura 7: Esquema general del humedal artificial de Flujo Subsuperficial.

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Unidades experimentales

La investigación estuvo conformada por tres tratamientos con dos repeticiones más un tratamiento control, haciendo un total de seis unidades experimentales. A su vez, cada unidad experimental presentó un envase de tecnopor con varias capas de arenilla, piedra chancada y arena gruesa en donde se sembraron 40 plántulas y se hizo discurrir el agua residual.

2.5. Identificación de variables y su mensuración

Para la medición de las variables se siguieron las siguientes metodologías (Anaya, 2019), que se indican en la Tabla 4.

Tabla 4

Mensuración de parámetros físicos-químicos.

| Parámetros | Unidades | Metodología empleada |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| pH | Unidades de pH | Potenciómetro |
| Conductividad | $\mu\text{S/cm}$ | Conductimetría |
| DBO | mg/L | Dilución |
| Nitrógeno total | mg/L | Fotometría |
| Fósforo total | mg/L | Fotometría |
| Plomo | mg/L | Fotometría |
| Temperatura | $^{\circ}\text{C}$ | Termómetro |

Fuente: Elaboración propia.

a. Medición de pH

Para la medición del pH en la investigación se usó el potenciómetro Hanna PH211, el cual fue previamente calibrado, para posteriormente ser lavado con agua desionizada entre cada medición.

b. Medición de la conductividad

Para la medición de conductividad se usó el conductímetro YSI 32 Digital Bench-model, previamente calibrado, cuyas unidades se indican en la Tabla 2.

c. Medición de la temperatura

Para la medición de la temperatura de las muestras se usó un termómetro de mercurio. Esta medición se realizó al inicio del experimento, de forma directa y se usó un termómetro de mercurio como instrumento de medición.

d. Determinación de nitrógeno total

En el análisis de remoción de nitrógeno, se utilizó el kit para la determinación de nitrógeno total de la marca WTW® y se siguieron los siguientes pasos (WTW, 2016): Se adicionaron los reactivos VARIO TN Persulfate Rgt y se agregó 0,5 ml de la muestra con la pipeta, se cerró la cubeta con el tapón roscado y se procedió a la mezcla de manera enérgica durante 30 s y posteriormente se calentó la cubeta a 120 °C en la unidad térmica durante 30 min. Finalmente se agregó el reactivo VARIO TN Reagent A y se colocó la cubeta en el equipo espectrofotométrico pHotoFlex®, de la marca WTW, y se inició la medición.

e. Determinación de fósforo total

Para la determinación de remoción de fósforo, se utilizó el kit para fósforo total de la marca WTW® y se siguieron los siguientes pasos (WTW, 2016): se llenó con una pipeta 5,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción, y se añadió el contenido del reactivo VARIO Potassium Persulfate F10 y se dejó en reposo durante 2 min, y se colocó la cubeta en el equipo espectrofotométrico pHotoFlex®, de la marca WTW a una longitud de onda de 420 nm, y se inició la medición.

f. Determinación del DBO₅

Para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno fue necesario realizar un test empírico que consistió en determinar el oxígeno consumido por microorganismos,

cuando se incubaron una muestra del agua residual tratado en la oscuridad a 20°C, durante 5 días, determinándose el oxígeno disuelto con el método Winkler azida modificada.

g. Cálculo de la eficiencia de remoción de carga del tratamiento propuesto

Se realizó el cálculo de cargas y se determinó la eficiencia de remoción de cada parámetro fisicoquímico. Se utilizó la siguiente ecuación descrita por Mena (2014):

$$\text{Carga (kg/día)} = \text{Concentración del Parámetro (mg/l)} * \text{Caudal (LPS)} * 0,0864$$

$$\text{Eficiencia de Remoción} = \frac{\text{Carga afluente} - \text{Carga efluente}}{\text{Carga afluente}} \times 100$$

2.6. Diseño estadístico del experimento

Para el experimento se usó un diseño completamente al azar (DCA), en donde se determinó si existe una diferencia significativa entre los tratamientos. En la Figura 8 se detalla el diseño experimental de la investigación.

2.7. Análisis estadístico de datos

Los datos generados en la investigación fueron registrados en una hoja de cálculo de Excel de Microsoft Office. Los resultados de remoción en los tratamientos fueron evaluados a través de un análisis de varianza de una vía (ANOVA), con un nivel de significancia de 0,05 haciendo uso del software SPSS v. 22.

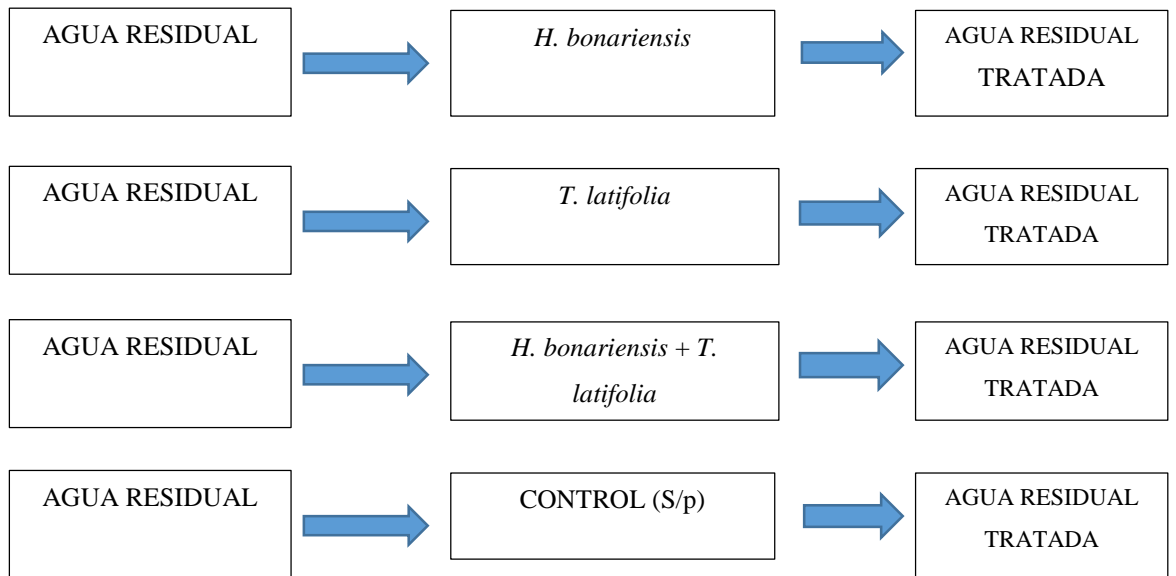


Figura 8. Diseño experimental de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Características físico-químicas iniciales de la muestra de agua del río Tarma

Se analizaron siete parámetros físico-químicos a las muestras de agua residual del río Tarma en condiciones de laboratorio. Todas las mediciones se hicieron por triplicado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Promedio de los resultados de los análisis físico - químico de la muestra de agua del río Tarma (promedio \pm desviación estándar).

| Parámetros | Unidades | Resultado | ECA para Agua (2017) ¹ | Cumplimiento de ECA para agua |
|------------------|--------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Nitrógeno total | mg/L | 10,99 \pm 0,0 | NA ³ | NA |
| Fósforo | mg/L | 4,66 \pm 0,005 | 0,05 | No |
| Plomo | mg/L | 4,77 \pm 1,30 | 0,0025 | No |
| DBO ₅ | mg/L | 57,60 \pm 2,2 | 10,0 | No |
| Conductividad | mS/cm | 1,8 \pm 0,9 | 1,0 | No |
| pH | Unidad de pH | 6,8 \pm 1,1 | 6,5-9,0 | Si |
| T | °C | 22,1 \pm 0,6 | $\Delta 3^2$ | NA |

¹ Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E2: ríos

$\Delta 3$: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

NA: No aplica.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, cuatro de los siete parámetros evaluados (57,14 % del total) no cumplen los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 2017).

El pH fue el parámetro que si cumplió con el ECA para agua al estar dentro del rango establecido (6,5-9,0). El parámetro nitrógeno total no aplica para la categoría 4: Conservación del ambiente acuático y sub categoría E2: ríos.

Los parámetros que excedieron el Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E1: Lagos y lagunas, fueron la conductividad eléctrica en un 80 %, la DBO₅ en un 476 %, el fósforo total en 9 220 % y el plomo en 190 800 %, con respecto a la temperatura, no se cuenta con datos anteriores de monitoreo de temperatura para el lugar de toma de muestra, por lo que no aplica el valor de este parámetro.

3.2. Resultados del cálculo de las dimensiones y características hidrológicas del humedal artificial.

La Tabla 6 muestra las dimensiones del humedal artificial, así como, las características hidrológicas del humedal artificial. El tiempo de retención hidráulica (0,18 días) presenta una equivalencia de 5 horas aproximadamente. Los cálculos se encuentran detallados en el Apéndice 1.

Tabla 6

Cálculo de las dimensiones del humedal artificial.

| Variabes | Valor |
|--|---------|
| L*W (m ²) | 0,8 |
| L = Largo (m) | 1,0 |
| W = Ancho (m) | 0,8 |
| S = Pendiente % | 0,00468 |
| K = Conductividad Hidráulica (cm/s) | 1000 |
| Q = Caudal (m ³ /día) | 0,6 |
| n = Porosidad (%) | 0,35 |
| TRH = Tiempo de retención Hidráulica (días) | 0,18 |

Fuente: elaboración propia.

3.3. Cálculo de las eficiencias de reducción y remoción de los parámetros físico-químicos de las muestras obtenidas del río Tarma

3.3.1. Cálculo de la eficiencia de reducción de la conductividad eléctrica

En la Tabla 7 se observan los resultados de las mediciones de la conductividad y su eficiencia de reducción (%) evaluados en los tres tratamientos y el control a distintas horas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 horas).

Los resultados muestran que los valores de la eficiencia de la reducción de la conductividad aumentan en todos los tratamientos excepto en el tratamiento 3 a las 15 y 20 horas con 9,75 y 9,80 % respectivamente. El control tuvo un valor máximo de reducción de la conductividad de 8,6 % a la hora 5 y cero reducciones a las 15, 20, 25 y 30 horas. El tratamiento 2 fue el que registro el valor máximo de reducción de la conductividad con un 50 % a las 30 horas.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente ($p < 0,05$) en la eficiencia de la reducción de la conductividad (Tabla 8). En tanto, en la prueba post hoc de Tukey, que permite evaluar las medias de forma individual, dio a conocer que en el tratamiento 2, la conductividad presenta diferencias significativas sobre los otros tratamientos (Apéndice 2).

Tabla 7

Valores de la eficiencia de la reducción de la conductividad (%) en los tratamientos y a distintas horas

| Tratamientos | Horas | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | | | | Eficiencia de reducción de iones (%) |
|--------------|-------|---|-------|---------------|-------|--------------------------------------|
| | | Entrada | | Salida | | |
| | | Concentración | Carga | Concentración | Carga | |
| T1 | 5 | 1,8 | 0,092 | 1,71 | 0,088 | 4,34 |
| | 10 | 1,77 | 0,088 | 1,66 | 0,085 | 3,40 |
| | 15 | 1,70 | 0,082 | 1,55 | 0,079 | 3,65 |
| | 20 | 1,69 | 0,081 | 1,50 | 0,077 | 4,93 |
| | 25 | 1,57 | 0,081 | 1,30 | 0,067 | 17,28 |
| | 30 | 1,48 | 0,072 | 1,10 | 0,056 | 22,22 |
| T2 | 5 | 1,8 | 0,092 | 1,40 | 0,072 | 21,73 |
| | 10 | 1,77 | 0,088 | 1,33 | 0,068 | 22,72 |
| | 15 | 1,70 | 0,082 | 1,20 | 0,061 | 25,6 |
| | 20 | 1,69 | 0,081 | 1,10 | 0,056 | 30,86 |
| | 25 | 1,57 | 0,081 | 0,88 | 0,045 | 44,44 |
| | 30 | 1,48 | 0,072 | 0,70 | 0,036 | 50,0 |
| T3 | 5 | 1,8 | 0,092 | 1,60 | 0,082 | 10,86 |
| | 10 | 1,77 | 0,088 | 1,5 | 0,077 | 12,5 |
| | 15 | 1,70 | 0,082 | 1,45 | 0,074 | 9,75 |
| | 20 | 1,69 | 0,081 | 1,4 | 0,073 | 9,80 |
| | 25 | 1,57 | 0,081 | 1,3 | 0,067 | 17,28 |
| | 30 | 1,48 | 0,072 | 1,1 | 0,056 | 22,22 |
| Control | 5 | 1,8 | 0,092 | 1,7 | 0,084 | 8,6 |
| | 10 | 1,77 | 0,088 | 1,7 | 0,084 | 4,5 |
| | 15 | 1,70 | 0,082 | 1,60 | 0,082 | 0,0 |
| | 20 | 1,69 | 0,081 | 1,60 | 0,082 | 0,0 |
| | 25 | 1,57 | 0,081 | 1,60 | 0,082 | 0,0 |
| | 30 | 1,48 | 0,072 | 1,57 | 0,081 | 0,0 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de la reducción de la conductividad en los tratamientos

| ANOVA | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----|------------------|--------|-------|
| Reducción de la conductividad | | | | | |
| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | 3032,293 | 3 | 1010,764 | 16,262 | 0,000 |
| Dentro de grupos | 1243,098 | 20 | 62,155 | | |
| Total | 4275,391 | 23 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Cálculo de las eficiencias de remoción del nitrógeno total

En la Tabla 9 se observan los resultados de las mediciones del nitrógeno total y su eficiencia de remoción (%) evaluados en los tres tratamientos y el control a distintas horas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 horas).

Los resultados muestran que los valores de la eficiencia de la remoción del nitrógeno total aumentan en todos los tratamientos y en el control, siendo el tratamiento 2 donde se registró el valor máximo de remoción del nitrógeno total con un 90,7 % a las 30 horas. El control registró el valor más bajo de eficiencia de remoción de nitrógeno con 7,1 % para la hora 5.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente en la eficiencia de la remoción del nitrógeno total ($p < 0,05$) (Tabla 10). En tanto, la prueba de Tukey dio a conocer que en el tratamiento 2, la variación del nitrógeno total fue significativa (Apéndice 3).

Tabla 9

Valores de la eficiencia de la remoción del nitrógeno total (%) en los tratamientos y a distintas horas

| | | Nitrógeno total (mg/L) | | | | Eficiencia de remoción (%) |
|--------------|-------|------------------------|-------|---------------|-------|----------------------------|
| Tratamientos | Horas | Entrada | | Salida | | |
| | | Concentración | Carga | Concentración | Carga | |
| T1 | 5 | 10,99 | 0,569 | 4,3 | 0,22 | 60,71 |
| | 10 | 11,0 | 0,57 | 4,0 | 0,20 | 64,9 |
| | 15 | 11,01 | 0,562 | 3,3 | 0,17 | 68,64 |
| | 20 | 11,05 | 0,57 | 2,8 | 0,14 | 75,43 |
| | 25 | 11,1 | 0,571 | 2,77 | 0,14 | 75,40 |
| | 30 | 11,1 | 0,571 | 2,2 | 0,11 | 80,73 |
| T2 | 5 | 10,99 | 0,569 | 2,8 | 0,14 | 75,0 |
| | 10 | 11,0 | 0,57 | 2,77 | 0,14 | 75,4 |
| | 15 | 11,01 | 0,562 | 2,2 | 0,11 | 80,42 |
| | 20 | 11,05 | 0,57 | 1,34 | 0,06 | 87,8 |
| | 25 | 11,1 | 0,571 | 1,10 | 0,05 | 90,0 |
| | 30 | 11,1 | 0,571 | 1,03 | 0,05 | 90,7 |
| T3 | 5 | 10,99 | 0,569 | 3,3 | 0,17 | 69,64 |
| | 10 | 11,0 | 0,57 | 2,8 | 0,14 | 75,43 |
| | 15 | 11,01 | 0,562 | 2,8 | 0,14 | 75,00 |
| | 20 | 11,05 | 0,57 | 2,6 | 0,13 | 77,19 |
| | 25 | 11,1 | 0,571 | 2,2 | 0,11 | 80,70 |
| | 30 | 11,1 | 0,571 | 2,2 | 0,11 | 80,70 |
| Control | 5 | 10,99 | 0,569 | 10,0 | 0,52 | 7,1 |
| | 10 | 11,0 | 0,57 | 9,4 | 0,48 | 15,78 |
| | 15 | 11,01 | 0,562 | 9,0 | 0,46 | 17,5 |
| | 20 | 11,05 | 0,57 | 8,0 | 0,41 | 28,07 |
| | 25 | 11,1 | 0,571 | 7,9 | 0,41 | 28,07 |
| | 30 | 11,1 | 0,571 | 7,9 | 0,41 | 28,07 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10

Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del nitrógeno total en los tratamientos

| ANOVA | | | | | |
|--|----------------------|----|---------------------|--------|-------|
| Eficiencia de la remoción de nitrógeno total | | | | | |
| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | 14620,621 | 3 | 4873,540 | 96,478 | 0,000 |
| Dentro de grupos | 1010,295 | 20 | 50,515 | | |
| Total | 15630,916 | 23 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Cálculo de las eficiencias de remoción del fósforo total

En la Tabla 11 se observan los resultados de las mediciones del fósforo total y su eficiencia de remoción (%) evaluados en los tres tratamientos y el control a distintas horas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 horas).

Los resultados muestran que los valores de la eficiencia de la remoción del fósforo total aumentan en todos los tratamientos y en el control, siendo el tratamiento 2 donde se registró el valor máximo de remoción del fósforo total con un 80,0 % a las 25 y 30 horas (ver Apéndice 3). El control registró el valor más bajo de eficiencia de remoción de fósforo con 4,16 % para la hora 5.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente en la eficiencia de la remoción del fósforo total ($p < 0,05$) (Tabla 12). La prueba de Tukey mostro diferencias significativas en la remoción de fósforo total en el tratamiento 2, mientras que en los otros tratamientos no se mostraron diferencias significativas (Apéndice 4).

Tabla 11

Valores de la eficiencia de la remoción del fósforo total (%) en los tratamientos y a distintas horas

| FÓSFORO TOTAL (mg/L) | | | | | | |
|----------------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|----------------------------|
| Tratamientos | Horas | Entrada | | Salida | | Eficiencia de remoción (%) |
| | | Concentración | Carga | Concentración | Carga | |
| T1 | 5 | 4,66 | 0,24 | 2,4 | 0,12 | 50,0 |
| | 10 | 4,60 | 0,23 | 2,1 | 0,10 | 56,5 |
| | 15 | 4,58 | 0,24 | 1,8 | 0,09 | 62,5 |
| | 20 | 4,55 | 0,23 | 1,6 | 0,082 | 64,3 |
| | 25 | 4,55 | 0,23 | 1,55 | 0,080 | 65,21 |
| | 30 | 4,53 | 0,23 | 1,0 | 0,051 | 77,82 |
| T2 | 5 | 4,66 | 0,24 | 1,55 | 0,080 | 65,21 |
| | 10 | 4,60 | 0,23 | 1,0 | 0,051 | 77,82 |
| | 15 | 4,58 | 0,24 | 0,98 | 0,050 | 78,26 |
| | 20 | 4,55 | 0,23 | 0,9 | 0,046 | 80,0 |
| | 25 | 4,55 | 0,23 | 0,9 | 0,046 | 80,0 |
| | 30 | 4,53 | 0,23 | 0,84 | 0,044 | 80,0 |
| T3 | 5 | 4,66 | 0,24 | 3,04 | 0,15 | 37,5 |
| | 10 | 4,60 | 0,23 | 3,0 | 0,15 | 34,78 |
| | 15 | 4,58 | 0,24 | 2,4 | 0,12 | 50,0 |
| | 20 | 4,55 | 0,23 | 1,8 | 0,09 | 60,8 |
| | 25 | 4,55 | 0,23 | 1,50 | 0,078 | 66,08 |
| | 30 | 4,53 | 0,23 | 1,3 | 0,067 | 70,8 |
| Control | 5 | 4,66 | 0,24 | 4,5 | 0,23 | 4,16 |
| | 10 | 4,60 | 0,23 | 4,4 | 0,22 | 4,34 |
| | 15 | 4,58 | 0,24 | 4,4 | 0,22 | 8,33 |
| | 20 | 4,55 | 0,23 | 4,2 | 0,21 | 8,6 |
| | 25 | 4,55 | 0,23 | 4,2 | 0,21 | 8,6 |
| | 30 | 4,53 | 0,23 | 4,0 | 0,20 | 13,04 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12

Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del fósforo total en los tratamientos

| ANOVA | | | | | |
|---|-----------|----|------------|--------|-------|
| Eficiencia de remoción de Fósforo total | | | | | |
| | Suma de | gl | Media | F | Sig. |
| | cuadrados | | cuadrática | | |
| Entre grupos | 16034,552 | 3 | 5344,851 | 59,753 | 0,000 |
| Dentro de grupos | 1788,994 | 20 | 89,450 | | |
| Total | 17823,546 | 23 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Cálculo de las eficiencias de reducción del DBO₅

En la Tabla 13 se observan los resultados de las mediciones del DBO₅ y su eficiencia de reducción (%) evaluados en los tres tratamientos y el control a 5, 10, 15, 20, 25 y 30 horas.

Los resultados muestran que los valores de la eficiencia de la reducción de la DBO₅ aumentan en todos los tratamientos, siendo el tratamiento 2 donde se registró el valor máximo de reducción del DBO₅ con un 78,24 % a las 30 horas. El valor máximo de eficiencia registrado en el tratamiento 1 y 3 fueron de 49,88 % y 61,61 %. El control registró valor de eficiencia de reducción máximo de 13,08 % a las 5 horas de exposición.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente en la eficiencia de reducción de la DBO₅ ($p < 0,05$) (Tabla 14).

Tabla 13

Valores de la eficiencia de la reducción de la DBO₅ (%) en los tratamientos a distintas horas.

| DBO ₅ (mg/L) | | | | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|-----------------------------|
| Tratamientos | Horas | Entrada | | Salida | | Eficiencia de reducción (%) |
| | | Concentración | Carga | Concentración | Carga | |
| T1 | 5 | 57,60 | 2,97 | 50,1 | 2,58 | 13,4 |
| | 10 | 60,4 | 3,13 | 58,2 | 3,01 | 12,0 |
| | 15 | 77,8 | 4,03 | 48,2 | 2,49 | 38,21 |
| | 20 | 100,5 | 5,20 | 78 | 4,05 | 22,11 |
| | 25 | 110,4 | 5,72 | 60 | 3,12 | 45,45 |
| | 30 | 110 | 5,70 | 55 | 2,86 | 49,82 |
| T2 | 5 | 57,60 | 2,98 | 55,1 | 2,85 | 4,36 |
| | 10 | 77,4 | 4,01 | 50,8 | 2,63 | 34,4 |
| | 15 | 98,4 | 5,1 | 48 | 2,48 | 51,3 |
| | 20 | 135,2 | 6,9 | 54,6 | 2,83 | 59,98 |
| | 25 | 160,5 | 8,3 | 45,6 | 2,36 | 71,56 |
| | 30 | 184 | 9,56 | 40 | 2,08 | 78,24 |
| T3 | 5 | 57,60 | 2,98 | 55,5 | 2,87 | 3,6 |
| | 10 | 70,5 | 3,65 | 50,0 | 2,59 | 29,0 |
| | 15 | 90,9 | 4,71 | 49,9 | 2,58 | 45,2 |
| | 20 | 91,3 | 4,73 | 49,0 | 2,54 | 46,3 |
| | 25 | 117,3 | 6,08 | 46,8 | 2,42 | 60,19 |
| | 30 | 122,2 | 6,33 | 47,0 | 2,43 | 61,61 |
| Control | 5 | 57,60 | 2,98 | 50,0 | 2,59 | 13,08 |
| | 10 | 70 | 3,62 | 65,5 | 3,39 | 6,3 |
| | 15 | 76 | 3,93 | 70,0 | 3,62 | 7,9 |
| | 20 | 95,0 | 4,92 | 88,0 | 4,56 | 7,3 |
| | 25 | 120,0 | 6,22 | 110,8 | 5,74 | 7,5 |
| | 30 | 144,5 | 7,49 | 140,0 | 7,25 | 3,2 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de reducción de la DBO₅ en los tratamientos.

| ANOVA | | | | | |
|---|----------------------|----|---------------------|-------|-------|
| Eficiencia de reducción de DBO ₅ | | | | | |
| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | 8175,906 | 3 | 2725,302 | 7,248 | 0,002 |
| Dentro de grupos | 7519,825 | 20 | 375,991 | | |
| Total | 15695,730 | 23 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Cálculo de las eficiencias de remoción del plomo

En la Tabla 15 se observan los resultados de las mediciones de plomo y su eficiencia de remoción (%) evaluados en los tres tratamientos y el control a 5, 10, 15, 20, 25 y 30 horas.

Los resultados muestran que los valores de la eficiencia de la remoción del plomo aumentan en todos los tratamientos, siendo el tratamiento 2 donde se registró el valor máximo de remoción del plomo con un 83,12 % a las 30 horas, siendo el valor máximo de eficiencia de remoción de plomo para el tratamiento 3 de 67,9 % y para el tratamiento 1 con 67,07 % ambos a las 30 horas (ver Apéndice 5). El control presenta un valor mínimo de 14,75 % de eficiencia de remoción de plomo para la hora 5 y un valor máximo de 29,62 % de eficiencia de remoción de plomo.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente en la eficiencia de remoción del plomo ($p < 0,05$) (Tabla 16). La prueba de Tukey mostró que no existe diferencias significativas entre cada uno de los tratamientos en la eficiencia de remoción de plomo (Apéndice 6).

Tabla 15

Valores de la eficiencia de la remoción de plomo (%) en los tratamientos y a distintas horas

| PLOMO (mg/L) | | | | | | |
|--------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|----------------------------|
| Tratamientos | Horas | Entrada | | Salida | | Eficiencia de remoción (%) |
| | | Concentración | Carga | Concentración | Carga | |
| T1 | 5 | 4,70 | 0,244 | 4,0 | 0,208 | 14,75 |
| | 10 | 4,69 | 0,243 | 3,54 | 0,184 | 24,27 |
| | 15 | 4,69 | 0,243 | 3,05 | 0,158 | 34,97 |
| | 20 | 4,68 | 0,243 | 2,55 | 0,132 | 45,67 |
| | 25 | 4,68 | 0,243 | 2,01 | 0,104 | 57,20 |
| | 30 | 4,68 | 0,243 | 1,55 | 0,080 | 67,07 |
| T2 | 5 | 4,70 | 0,244 | 3,98 | 0,206 | 15,57 |
| | 10 | 4,69 | 0,243 | 3,02 | 0,157 | 35,39 |
| | 15 | 4,69 | 0,243 | 2,56 | 0,133 | 45,26 |
| | 20 | 4,68 | 0,243 | 2,05 | 0,106 | 56,37 |
| | 25 | 4,68 | 0,243 | 1,1 | 0,057 | 76,56 |
| | 30 | 4,68 | 0,243 | 0,8 | 0,041 | 83,12 |
| T3 | 5 | 4,70 | 0,244 | 4,30 | 0,22 | 9,83 |
| | 10 | 4,69 | 0,243 | 4,10 | 0,21 | 13,58 |
| | 15 | 4,69 | 0,243 | 3,60 | 0,18 | 25,92 |
| | 20 | 4,68 | 0,243 | 3,10 | 0,16 | 34,15 |
| | 25 | 4,68 | 0,243 | 2,0 | 0,10 | 58,8 |
| | 30 | 4,68 | 0,243 | 1,50 | 0,078 | 67,9 |
| Control | 5 | 4,70 | 0,244 | 4,0 | 0,208 | 14,75 |
| | 10 | 4,69 | 0,243 | 3,5 | 0,182 | 25,1 |
| | 15 | 4,69 | 0,243 | 3,4 | 0,176 | 27,5 |
| | 20 | 4,68 | 0,243 | 3,4 | 0,176 | 27,5 |
| | 25 | 4,68 | 0,243 | 3,3 | 0,171 | 29,62 |
| | 30 | 4,68 | 0,243 | 3,3 | 0,171 | 29,62 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del plomo en los tratamientos y sus horas.

| Pruebas de efectos inter-sujetos | | | | | |
|---|-------------------------------|----|------------------|-----------|-------|
| Variable dependiente: remoción de plomo | | | | | |
| Origen | Tipo III de suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Modelo corregido | 31540,634 ^a | 23 | 1371,332 | 721,595 | 0,000 |
| Intersección | 105299,194 | 1 | 105299,194 | 55408,477 | 0,000 |
| Tratamientos | 6759,289 | 3 | 2253,096 | 1185,580 | 0,000 |
| Tiempo | 20273,009 | 5 | 4054,602 | 2133,533 | 0,000 |
| Tratamientos * Tiempo | 4508,336 | 15 | 300,556 | 158,153 | 0,000 |
| Error | 91,220 | 48 | 1,900 | | |
| Total | 136931,048 | 72 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6. Variación del pH en los tratamientos

En la Tabla 17 se muestran los valores de pH obtenidos en los tres tratamientos y el control. Los resultados muestran un descenso en el pH con una tendencia ligera hacia la acidez, siendo el valor más bajo de 5,8 para el tratamiento 2, seguido del tratamiento 1 con 6,02 y 6,3 para el tratamiento 3 respectivamente, todas ellas a las 30 horas de evaluación.

Tabla 17

Valores del pH en los tratamientos y el control a las distintas horas evaluadas

| Valores de pH | | | | |
|---------------|------|------|------|---------|
| Tratamientos | | | | |
| Horas | T1 | T2 | T3 | control |
| 5 | 7,20 | 7,02 | 6,9 | 7,1 |
| 10 | 7,01 | 6,6 | 6,7 | 7,16 |
| 15 | 6,8 | 6,2 | 6,65 | 7,20 |
| 20 | 6,7 | 6,0 | 6,60 | 7,22 |
| 25 | 6,65 | 5,9 | 6,50 | 7,3 |
| 30 | 6,02 | 5,8 | 6,3 | 7,9 |

Fuentes: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

La presente investigación constituye uno de los primeros trabajos donde se evaluó el efecto de los humedales artificiales compuesto por dos tipos de macrófitas, cuyos resultados permiten establecer una reducción considerable de contaminantes. Esta reducción ejercida por los humedales ha sido estudiada por Bahlo y Wach (1990) quienes establecen que este ecosistema crea mejores condiciones para la sedimentación de sólidos en suspensión, reduce el riesgo de erosión y resuspensión, y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la planta.

En esta investigación las eficiencias de reducción de la conductividad eléctrica en todos los tratamientos fueron altos, obteniendo valores de conductividad por debajo del rango establecido por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 2017) Categoría 4: Conservación del ambiente acuático. El valor más bajo se obtuvo en el tratamiento 2 con valores de 0,70 mS/cm, pues el mínimo valor establecido para esta categoría es de 1,0 mS/cm, pudiendo ser apta para esta actividad. Resultados similares de reducción en la conductividad eléctrica fueron reportados por Nuñez (2016), quien realizó investigaciones en humedales de flujo subsuperficial usando *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales domésticas, obteniendo valores de reducción de 0,8 a 0,370 mS/cm en la conductividad y que representó el 55 % de la eficiencia de reducción. Quintero (2014) realizó investigaciones en humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas superficiales, y encontró reducciones en la conductividad de 0,057 mS/cm a 0,017 mS/cm que presentaba una alta significancia ($p < 0,005$) entre el humedal propuesto y la remoción de este parámetro. En la presente investigación se ha encontrado también, altas significancias ($p < 0,05$) entre los tratamientos usando las dos plantas y la reducción de la conductividad, logrando reducciones de hasta 1,1 mS/cm y que represento un 22,22 %. Esta reducción de la conductividad eléctrica se podría deber a la presencia de material mineral en el agua residual que se va almacenando lentamente en el sistema, lo que ayudaría a la colmatación del humedal. Esta colmatación del filtro llevaría a la reducción de la conductividad tal como lo explica Kadlec y Knight (1996). Estos resultados muestran el

potencial de control de la conductividad en el tratamiento de aguas residuales usando *Typha latifolia*.

Generalmente los humedales artificiales, considerados como plantas depuradoras de aguas residuales urbanas, permiten la eliminación de materia en suspensión, materia orgánica y nutrientes, especialmente la presencia del nitrógeno, tal como lo refiere Garcia y Corzo (2009). En la presente investigación el porcentaje de eficiencia de remoción del nitrógeno ha sido alta en todos los tratamientos, siendo 90,7 % el valor máximo de eficiencia obtenido en esta investigación, y correspondió al tratamiento con *Typha latifolia* exclusivamente. Altos valores de remoción del nitrógeno total (90 %) han sido reportados por García (2010), usando una combinación continua de humedales tanto verticales como horizontales, con la macrófita emergente *Cyperus papyrus*, para el tratamiento de aguas residuales. Otros reportes de la remoción de nitrógeno han sido presentados por Bedoya *et al.* (2014) en humedales de flujo subsuperficial usando la planta *Typha latifolia*, obteniendo valores de 57,3 % de remoción de nitrógeno total. Esta reducción del nitrógeno podría deberse a que en los humedales se observa que la eliminación de nitrógeno lo realiza principalmente los microorganismos, y se inicia en algunos casos con el proceso de nitrificación seguida de desnitrificación (Garcia y Corzo, 2009). Se han observado que las plantas en los humedales horizontales favorecen la eliminación de nitrógeno, superando los inconvenientes propios de su diseño y que generan una baja transferencia de oxígeno; así como, pocas zonas aerobias y un bajo rendimiento de eliminación de amonio. Además de permitir el almacenamiento para el nitrógeno, las plantas ayudan en la eliminación microbiana de compuestos nitrogenados tal como lo refiere Tanner (1996). En la presente investigación las presencias de los dos tipos diferentes de plantas favorecieron la remoción del nutriente nitrógeno presente en las aguas residuales; a su vez el análisis de la varianza de los valores de eficiencia de remoción del nitrógeno total en los tratamientos mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) (Tabla 10), lo que corrobora la disminución de este nutriente por la actividad de *T. latifolia* y *C. papyrus*.

La investigación presenta resultados máximos de eficiencia de remoción para el nutriente fósforo en un 80 % para el tratamiento con *T. latifolia*. Bedoya *et al.* (2014) también reportan un alto valor de remoción de este nutriente con 97,1 % realizado por la macrófita

T. latifolia y 95,9 % de remoción para la macrófita *Cyperus papyrus* en humedales artificiales. También se han realizado investigaciones en humedales con presencia de plantas y sin plantas, dando como resultado valores de remoción de fósforo de 93,2 % y 86,4 % respectivamente, en aguas residuales tal como lo refieren Reyes *et al.* (2011). Además, la disminución de fósforo está relacionada con los tratamientos que influyen significativamente en la eficiencia de la remoción del fósforo total ($p < 0,05$). La remoción de este nutriente en aguas contaminadas ha sido estudiada ampliamente, así Tanner (1996) refiere que la disminución del fósforo por los humedales artificiales se produce gracias a que este nutriente es sedimentado y adsorbido por parte del lecho y asimilado por parte de las plantas; además, el crecimiento de las plantas ayuda a la captación del fósforo. También se ha registrado la adsorción de fósforo producto del aumento de la descomposición microbiana, generada por la presencia de oxígeno expulsado por las raíces de las plantas. En consecuencia, la cantidad de fósforo asimilado por las plantas o fijado en el sustrato fue alto y sugieren que los humedales, bajo condiciones experimentales constituyeron un método efectivo para la eliminación de fósforo.

En la presente investigación la reducción máxima del DBO₅ fue de 184 a 40,0 mg/L para al tratamiento 2, correspondiéndole una eficiencia de reducción máxima de 78,24 %. Este valor de DBO₅ se halla por encima del rango establecido por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 2017 para la conservación del ambiente acuático (10 mg/L) (ver Apéndice 7). Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSH), son considerados como los más eficientes en la reducción de la DBO₅; así, Pérez *et al.* (2012) han reportado valores de 91 % de reducción para la DBO₅, utilizando el papiro *Cyperus* como macrófita remediadora en el humedal. Se han realizado reducciones de la DBO₅ usando otras plantas; así Muñoz (2015) usó la especie *Zantedeschia aethiopica* para reducir el DBO₅ en un sistema de humedales horizontal subsuperficial logrando reducciones de 56,65 %. También se han reportado remociones en la DBO₅ del 23,1 % del humedal de flujo superficial teniendo a *Lemna* sp. como especie vegetal del sistema (Quintero, 2014). Esta menor reducción de la DBO₅ en aguas residuales por humedales superficiales ha sido explicada por Kadlec (2003) quien indica, que los humedales de flujo subsuperficial registran altas reducciones de DBO₅ en comparación con los sistemas de flujo superficial. Con respecto a la dirección del flujo, los humedales subsuperficiales de flujo vertical y los de flujo horizontal presentan altos valores de remoción

de la DBO₅. En los humedales artificiales la reducción de la DBO₅ se produce por la absorción de compuestos orgánicos y por oxidación bacteriana principalmente. Investigaciones realizadas por la United State Environmental Protection Agency ([USEPA], 2000), los resultados obtenidos en estudios, demuestran que mediante el uso de plantas acuáticas flotantes se pueden lograr buenas eficiencias en la reducción de los contaminantes más comunes de las aguas residuales domésticas, siendo el “jacinto de agua” una de las plantas más eficientes, lográndose reducciones superiores al 70% en DBO₅, con cargas orgánicas altas, con tan solo un día de tiempo de retención (Lara, 1999), comprobándose que tiempos de retención hidráulicos cortos, como los obtenidos en la investigación, permiten reducir completamente la DBO₅, en esta investigación el tiempo de retención de 0,18 días permitió que la especie *T. latifolia* pueda generar una alta reducción de este parámetro. Adicionalmente, los resultados del análisis de la varianza muestran que los tratamientos (tiempos de exposición) influyen significativamente en la eficiencia de reducción de la DBO₅ ($p < 0,05$).

Las plantas emergentes son las principales responsables de la remoción de metales pesados, entre ellos al plomo, en sistemas de humedales artificiales. Al igual que el fósforo, los metales pesados son fijados en el lecho filtrante por microorganismos presentes (Tilley, 2008). En esta investigación se obtuvieron valores altos de remoción de plomo (83,12 %) usando *T. latifolia* como la planta más eficiente que *Hydrocotyle bonariensis*. Otras investigaciones han reportado valores altos de remoción de plomo; así, Rivas (2014) reporta 89,0 % de remoción de este metal pesado usando la planta *Phragmites australis* en humedales subsuperficiales. Esta reducción del metal pesado es muy probable que esté relacionado con la completa adaptación de las bacterias tolerantes a las condiciones de los humedales artificiales, en especial la interacción con la vegetación presente, ya que se tiene evidencia de que el plomo tiende a acumularse en el rizoma y las raíces de las plantas acuáticas durante los primeros días, tal como lo refieren Deng *et al.* (2004). Estos resultados denotan la habilidad de las bacterias para adaptarse a medios contaminados con plomo, y seguir desempeñando sus funciones metabólicas para interactuar con la vegetación y propiciar la remoción del metal, a pesar de no ser tolerantes en un principio, característica evolutiva que sugieren Rathnayake *et al.* (2010). Esta afirmación coincide con lo mencionado por Lyer *et al.* (2005), quienes establecen que los microorganismos contienen

mecanismos naturales de desintoxicación de plomo por medio de exudados celulares, que a la vez funcionan como agentes quelantes.

En la presente investigación el valor de pH, en los tratamientos, osciló entre los valores de 7,20 ligeramente alcalino a valores de acides de 5,8; siendo el tratamiento dos (T2) el que presentó estos valores de pH. Las investigaciones realizadas por Bedoya *et al.* (2014) en humedales subsuperficiales, permitió observar y registrar las reducciones del pH de 8,7 a 7,09. Kadlec y Wallace (2009) observaron que, en humedales de flujo subsuperficial, el pH promedio del efluente registrado fue de $7,33 \pm 0,32$, este pH levemente básico próximo a la neutralidad, se podría deber a la presencia de la materia orgánica procedente de la descomposición que tiene lugar en el sistema. Según Yañez (2018) en humedales artificiales a escala de laboratorio, el pH afectaría a los humedales construidos, ya que gran parte de la actividad microbiana es sensible al pH, que suele estar entre 4 y 9,5. En la presente investigación, por los valores de pH obtenidos, podrían desarrollarse procesos óptimos de nitrificación y desnitrificación en los humedales artificiales, lo que favorecería en la disminución de este contaminante.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Se determinó la eficiencia de la fitorremediación de las plantas *Hydrocotyle bonarensis* y *Typha latifolia* en el agua residual, siendo *T. latifolia* la cual presentó los mayores valores de reducción en los parámetros de la conductividad eléctrica (T2) y DBO₅ (T2) con valores de reducción de 50,0 % y 78,24 % respectivamente; y los mayores valores de remoción en los parámetros de nitrógeno total (T2), fósforo total (T2) y plomo (T2) con valores de remoción de 90,7 %, 80,0 % y 83,12 % respectivamente. El tratamiento que estuvo conformado por el humedal artificial de flujo subsuperficial, conteniendo a las 2 especies de plantas juntas presentaron menor valor de reducción para la conductividad eléctrica (22,2 %); y menores valores de remoción para el nitrógeno total (80,7 %), fósforo total (70,8 %) y plomo (67,9 %).
2. Los resultados obtenidos demuestran que el humedal artificial de flujo subsuperficial, bajo condiciones experimentales, constituye un método efectivo en el tratamiento de aguas residuales de una manera segura y confiable. La remoción de contaminantes, como el metal pesado plomo, es eficiente y no requiere de energía adicional para su funcionamiento.
3. Se logró el cumplimiento del 25 % de los parámetros con respecto al ECA para aguas, logrados después del tratamiento con las plantas *Hydrocotyle bonarensis* y *Typha latifolia* en humedales artificiales. La conductividad eléctrica fue el parámetro que redujo por debajo del ECA para agua de la categoría ambiente acuático en un 50 % para el tratamiento 2.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la evaluación de la reducción de otros parámetros de calidad de agua como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y materia orgánica.
2. Realizar un mantenimiento y cuidado de la vegetación utilizada en la construcción del humedal artificial, realizando podas que permitan el crecimiento controlado y generación de nuevos tallos.
3. Establecer correctamente el tiempo de retención hidráulica, dado que las retenciones prolongadas podrían generar la presencia de insectos y malos olores en el cuerpo de agua.
4. Estudiar las asociaciones de microorganismo presentes en el humedal, que potencialmente sean útiles para actividades biotecnológicas y puedan ser potenciales degradadores de materia orgánica.

REFERENCIAS

- Alcántara, Y. (2016). *Estudio de viabilidad para el diseño de un sistema ecotecnológico innovador que administre y reutilice el agua de la lavadora para generar áreas verdes en el hogar*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana. México. <http://hdl.handle.net/11191/6005>
- Anaya, J. (2019). *Evaluación de la remoción de nitrógeno total y fósforo total presentes en las aguas del humedal de santa rosa mediante la bacteria Pseudomonas putida ATCC 49128*. (Tesis de grado). Universidad Católica Sedes Sapientiae. Perú. http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/654/Anaya_Jhony_tesis_bachiller_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 07 de julio de 2017, pp 10-19. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Arenas, J.A. y García, F. (1993). Atlas carpológico y corológico de la subfamilia *Apioideae* Drude (*Umbelliferae*) en España peninsular y Baleares. *Ruizia*: 12, 1-247. <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/1948/978-84-00-07357-2/atlas-carpologico-y-corologico-de-la-subfamilia-ap.html>
- Arias, O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. (tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Catalunya. Department d'Enginyeria Hidráulica, Marítima y Ambiental. Barcelona, España. <http://hdl.handle.net/2099.1/3339>
- Azcona, M., Ramírez, R. y Vicente, F. (2015). Efectos tóxicos del plomo. *Rev Esp Méd Quir.*;20:72-7. <https://www.medigraphic.com/pdfs/quirurgicas/rmq-2015/rmq1511.pdf>
- Bahlo, K. E. y Wach, F. G. (1990). Purification of domestic sewage with and without faeces by vertical intermittent filtration in reed and rush beds. In *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. P. F. Cooper and B. C. Findlater (Eds). Pergamon Press. Oxford. UK. pp. 215-221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040784-5.50025-5>
- Bedoya, J., Ardila, A. y Reyes, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (3), 275-283.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300004

- Brix, H.(1994) Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29 (4), 71-78.
https://www.researchgate.net/publication/230563373_Functions_of_Macrophytes_in_Constructed_Wetlands
- Brix, H., (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland?. *Water Science and Technology* 35(5), 11–17.
https://www.researchgate.net/publication/230563377_Do_Macrophytes_Play_a_Role_in_Constructed_Treatment_Wetlands
- Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. y Andrade M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión del Agua. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Deng, H., Ye, Z. H. y Wong, M. H. (2004). Accumulation of Lead, Zinc, Cooper and Cadmium by 12 Wetland Plant Species Thriving in Metal-contaminated Sites in China. *Environmental Pollution*, 132(1), 29-40. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.03.030
- García, J. (2004). *Tratamiento de aguas industriales: Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno*, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana. Barcelona.España.
- García, J. (2010). *Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Condiciones Tropicales*. Pereira, Colombia. (Tesis de Maestría). España. <http://hdl.handle.net/11059/2118>
- García, J., Corzo, A., (2009). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. *UPCommons*, Barcelona. https://humedales-construidos-wetlands.fr/wp-content/uploads/2015/11/JGarcia_and_ACorzo.pdf
- García, J., Ojeda, E., Sales, E., Chico, F., Píriz, T., Aguirre, P. y Mujeriego, R. (2003). Spatial variations of temperature, redox potential and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng*, 722, 1-14.

- Food and Agricultural Organisation (2006) Wastewater Treatment
<http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e06.htm#TopOfPage>
- González, F. (2002), Humedales Artificiales Para Depuración. Manual de fitodepuración. *Filtros de Macrofitas En Flotación*. 79–90
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación (5ta ed.). Editorial McGraw-Hill Interamericana. México D.F.
https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigaci%C3%B3n%20ta%20Edici%C3%B3n.pdf
- Kadlec, R. (2003). The limits of phosphorus removal wetlands. *Wetlands ecology*, 7(24), 165- 175. DOI: 10.1023/A:1008415401082
- Kadlec, R. y Knight, R. (1996) *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. En: *IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control*. IWA Publishing, p. 156
- Kadlec and Wallace (2009). *Treatment Wetlands*, 2nd Edition. CRC Press Taylor y Francis Group. Boca Raton.
- Kumari, M. y Tripathi B. (2014) Effect of aeration and mixed culture of *Eichhornia crassipes* and *Salvinia natans* on removal of wastewater pollutants. *Ecol Eng* 62:48–53. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857413004230>
- Lara, J. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. (Tesis de Maestría). Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona, España.
https://www.researchgate.net/publication/230887937_Depuracion_de_Aguas_Residuales_Municipales_con_Humedales_Artificiales
- Lyer, A., Mody, K., y Jha, B. (March, 2005). Biosorption of Heavy Metals by a Marine Bacterium. *Marine Pollution Bulletin*, 50, 340-343.
- Medina, F. y López, E. (2015). *Determinación de la eficiencia del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en el barranco del sector cruce de uchuglla, de la ciudad de moyobamba 2013*. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Martín.
- Mejía, F. y Pérez, K. (2016). *Eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un biodigestor prefabricado en la subestación eléctrica Cotaruse* -

Apurímac. (tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2591>

Mena, P.A. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia* (Tesis de maestría) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5825_MenaCabrera.pdf

Muñoz, N. (2015). *Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Grises por Medio de Biojardinería Aplicado a Viviendas Rurales del Departamento de Quiché*. Quiché, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/1058>

Nicolas, A.N. y Plunkett, G. (2009). The demise of subfamily Hydrocotyloideae (Apiaceae) and the re-alignment of its genera across the entire order Apiales. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 53: 134–151

Núñez, M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, mediante la especie macrófita emergente Cyperus Papyrus (Papiro)*.(Tesis de grado). Universidad Peruana Unión. Perú.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2875/P10-G654-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Obuobie, E., Keraita B. N., Danso, G., Amoah, P., Cofie, O. O. Raschid-Sally, L. and Dreschsel, P (2006) *Sanitation and Urban Wastewater Management” Book Chapter in Irrigated Urban Vegetable Farming in Ghana: Characteristics, Benefits and Risks*
<http://www.cityfarmer.org/GhanaIrrigateVegis.htm>

Quintero, A. (2014). Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales, *Ingenium*, vol. 15 (29), pp. 85-112.
https://www.researchgate.net/publication/309093059_Evaluacion_de_humedales_artificiales_pilotos_de_flujo_horizontal_y_tipo_superficial_y_subsuperficial_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales

Patiño, F. y Zhinín, L. (2015). *Estudio Comparativo de la Capacidad Depuradora de Phragmites australis y Cyperus papyrus en Humedales Artificiales Subsuperficiales de Flujo Vertical Para el Tratamiento de Aguas Residuales en el Cantón Santa Isabel*. (Tesis de grado), Universidad de Cuenca, San Joaquin, USA.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23197>

- Peña, D. y Infante, R. (2012). *Evaluación de la eficiencia de remoción de un humedal artificial en función de la granulometría de la grava en el medio filtrante*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3382>
- Pérez, R., Alfaro, C., Sasa, J., y Agüero, J. (2012). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Costa Rica (Vol. 27). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4945333>
- Raffo, E. y Ruíz, E. 2014. Caracterización de las Aguas Residuales y la Demanda Bioquímica de Oxígeno. *Industrial Data*. 17 (1): 71-80. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/download/12035/10751/>
- Rathnayake, I. N., Megharaj, M., Bolan, N., y Naidu, R. (2010). Tolerance of Heavy Metals by Gram Positive Soil Bacteria. *International Journal of Civil and Environmental Engineering and Technology*, 2(4), 191-195. https://www.researchgate.net/publication/242602550_Tolerance_of_Heavy_Metals_by_Gram_Positive_Soil_Bacteria
- Real Academia Española. (2001). *Diccionario de la lengua española [Dictionary of the Spanish Language]* (22nd ed.). Madrid, España. <https://www.rae.es/recursos/diccionarios/diccionarios-antiguos-1726-2001/diccionario-de-la-lengua-espanola-2001>
- Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 11 de enero de 2016. http://ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf
- Reyes, M.; A. Guido; S. Carrillo y C. Durán. 2011. Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Química Central*. 2(1):25-32. <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/QUIMICA/article/download/546/532/>
- Rivas Hernández, A. (2014). *Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua: memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Libro de resúmenes. México. 189 p. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Rodríguez, J. (2009). Parámetros fisicoquímicos, dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizadas en conjunto en el distrito de

Grecia. Revista Pensamiento actual. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamiento-actual>.

Rodríguez, T y Ospina, I. (2005). Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. https://www.researchgate.net/publication/28168350_Humedales_artificiales_de_flujo_vertical_para_mejorar_la_calidad_del_agua_del_rio_de_Bogota

Ruiz, H. y Pavón, J. (1798). *Systema vegetabilium florum peruviana et chilensis: characteres prodromi genericos differentiales, specierum omnium differentias, durationem, loca natalia, tempus florendi, nomina vernacula, vires et usus nonnullis illustrationibus interspersis complectens*. Sancha, Madrid, España. <http://hdl.handle.net/10481/43972>

Salazar, D. B. (2003). *Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales*. Guatemala: Programa Ambiental Regional para Centroamerica. Guatemala.

Sánchez, D. (2010). *Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Smith, G.S. (2000). "Typhaceae". En: Flora of North America Vol. 22. Oxford University Press. Online at: www.EFloras.org.

Tanner, C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems - A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecology Enginier*. (7), 59-83. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00066-6)

Tejeda J.C. (2010). *Diseño de un humedal para la remoción de Cd, As y Cr con plantas de Typha latifolia(espadaña)*. Tesis de maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. <http://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3701>

Tilley, E. (2008). Compendium of Sanitation Systems and Technologies (pre print). *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)*, 5(3), 24-30

Tito, C.(2015). *Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguayita Cyperus altemifolius en humedales artificiales*. (Tesis de grado). Universidad Cesar Vallejo. Perú.

- Torres, J. D., Magno, J. S., Pineda, R. R., y Cruz, M. A. (2015). Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies *Cyperus Papyrus* y *Phragmites Australis*, en Carapongo-Lurigancho. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 1(2), 54-57. https://www.researchgate.net/publication/322964639_Evaluacion_de_la_eficiencia_en_el_tratamiento_de_aguas_residuales_para_riego_mediante_humedales_Artificiales_de_flujo_libre_superficial_FLS_con_las_especies_Cyperus_Papyrus_y_Phragmites_Australis_en_C
- T. Taufikurahman, M. A. S. Pradisa, S. G. Amalia, and G. E. M Hutahaean (2019). Phytoremediation of chromium (Cr) using *Typha angustifolia L.*, *Canna indica L.* and in surface flow system of constructed wetland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 308 (012020). doi:10.1088/1755-1315/308/1/012020
- United States Environmental Protection Agency (2000). *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, Ohio, Estados Unidos. <http://water.epa.gov/type/wetlands/restore/upload/constructed-wetlands-designmanual.pdf>
- Watson, L., y Dallwitz, M.J. (1992). *The families of Flowering Plants: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. Version: 14th December 2000. Recuperado de <http://biodiversity.uno.edu/delta>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP]. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Francia, París. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/images/0024/002476/247647s.pdf>
- Yañez, S. (2018). *Influencia del pH en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en humedales construido de flujo vertical*. (Trabajo de fin de grado). Universidad de la Coruña.61 p. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20315/YanezTorrente_Sandra_TFG_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

TERMINOLOGÍA

La terminología ha sido extraída de diccionario de la Real Academia Española (2001).

- **Afluentes:** Es habitual en la hidrología en referencia al cuerpo de agua cuya desembocadura no se produce en el mar, sino que lo hace en un río superior o de mayor importancia.
- **Contaminación:** Cambio perjudicial en las características del ambiente y que afecta a los seres vivos.
- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Es decir, se refiere a la cantidad de oxígeno requerido por un grupo de bacterias para la descomposición de la materia orgánica. Si la medición se realiza al quinto día, el valor se conoce como DBO.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** Se refiere al parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerido para la descomposición de la materia orgánica utilizando agentes químicos.
- **Depuración del agua:** Eliminación de los materiales en suspensión, partículas y microorganismos presentes en el agua destinada al consumo humano u otras actividades humanas mediante la sedimentación, la filtración, la cloración, etc.
- **Estándar de calidad ambiental:** Concentración promedio de contaminantes permitidos en un medio concreto.
- **Fitodepuración:** Es una técnica de purificación caracterizada por tratamientos de tipo biológicos, en el cual las plantas que crecen en aguas saturadas de nutriente desarrollan un papel clave y directo sobre las bacterias que colonizan el sistema de raíces y al rizoma. Estos tratamientos son vistos como alternativas y como apoyo a los sistemas tradicionales basados en procesos biológicos y químicos y reacciones físicas.

- **Impacto ambiental:** Efecto que produce la actividad humana sobre el ambiente. Entendido también como una alteración positiva o negativa de uno o más de los componentes del ambiente, provocados por la acción de un proyecto.
- **Infiltración:** Flujo del agua o de otro fluido a través de los poros de un cuerpo sólido. Flujo del agua a través del suelo.
- **Macrófita:** Plantas acuáticas grandes como contraposición al fitoplancton y otras algas pequeñas macromolécula, por ejemplo, de una proteína por efecto del calor.
- **Microorganismo:** Los microorganismos son aquellos seres vivos más diminutos que únicamente pueden ser apreciados a través de un microscopio. En este extenso grupo podemos incluir a los virus, las bacterias, levaduras y mohos que pululan por el planeta tierra.
- **Monitoreo:** Vigilancia ambiental.
- **Oxígeno disuelto.** Es la cantidad de oxígeno presente en el agua y es uno de los parámetros que representan la actividad aerobia de una gran cantidad de organismos durante el proceso de depuración de aguas residuales.
- **Parámetro:** Elemento o dato importante desde el que se examina un tema, cuestión o asunto.
- **Retención.** Relación entre el volumen del tanque y el caudal afluente, también se denomina tiempo de llenado.
- **Reutilización:** Acción y efecto de reutilizar. Utilizar algo, ya sea con la función que desempeñaba anteriormente o con otros fines.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

Cálculo de las dimensiones y características hidrológicas del humedal artificial.

a. Determinación del ancho del humedal (W)

De la fórmula siguiente se reemplazó los valores:

$$W = \frac{1}{y} * \left[\frac{(Q)(As)}{(m)(Ks)} \right]^{0.5}$$

W = Ancho del Humedal

Q = 0,6 m³/día

m = 0,0046

Ks = 1 000 m³/m²/d

As = 0,8 m²

Y= 0,40 m

$$W = 0,8 = \frac{1}{4} * \left[\frac{(0,6 \text{ m}^3/\text{día})(0,8 \text{ m}^2)}{(0,0046)(1 000 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d})} \right]^{0.5}$$

b. Determinación del largo del humedal

De la fórmula siguiente se reemplazó los valores:

$$L = \frac{As}{W}$$

L = Largo del Humedal

As = 0,8 m²

W = 0,8 m

$$L = 1,0 \text{ m} = \frac{0,8 \text{ m}^2}{0,8 \text{ m}}$$

c. Determinación del tiempo de retención hidráulica

De la fórmula siguiente se reemplazó los valores:

$$TRH = \frac{(As)(Y)(n)}{Q}$$

Donde:

TRH = Tiempo de Retención Hidráulica

As: 0,8 m²

Y: 0,40 m

n: 35 %

Q: 0,6 m³/día

$$TRH = 0,18 \text{ días} = \frac{(0,8 \text{ m}^2)(0,40 \text{ m})(0,35)}{0,6 \text{ m}^3/\text{día}}$$

APÉNDICE 2

Prueba de Tukey de la variación de la reducción de la conductividad

| Reducción de la conductividad | | | |
|-------------------------------|---|---------|---------|
| HSD Tukey ^a | | | |
| Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
| TRATAMIENTOS | N | 1 | 2 |
| CONTROL | 6 | 2,1833 | |
| TRATAMIENTO 1 | 6 | 9,3033 | |
| TRATAMIENTO 3 | 6 | 13,7350 | |
| TRATAMIENTO 2 | 6 | | 32,5583 |
| Sig. | | ,084 | 1,000 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

APÉNDICE 3

Prueba de Tukey de la variación de la remoción del nitrógeno total

| Remoción de nitrógeno | | | | |
|------------------------------|---|---------|---------|---------|
| HSD Tukey ^a | | | | |
| Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | |
| TRATAMIENTOS | N | 1 | 2 | 3 |
| | 6 | 20,7650 | | |
| CONTROL | | | | |
| TRATAMIENTO 1 | 6 | | 70,9683 | |
| TRATAMIENTO 3 | 6 | | 76,4433 | 76,4433 |
| TRATAMIENTO 2 | 6 | | | 83,2200 |
| Sig. | | 1,000 | ,553 | ,374 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

APÉNDICE 4

Prueba de Tukey de la variación de la remoción del fósforo total

| Remoción de Fósforo | | | | |
|------------------------------|---|--------|---------|---------|
| HSD Tukey ^a | | | | |
| Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | |
| TRATAMIENTOS | N | 1 | 2 | 3 |
| CONTROL | 6 | 7,8450 | | |
| TRATAMIENTO 3 | 6 | | 53,3267 | |
| TRATAMIENTO 1 | 6 | | 62,7217 | 62,7217 |
| TRATAMIENTO 2 | 6 | | | 76,8817 |
| Sig. | | 1,000 | ,340 | ,076 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

APÉNDICE 5

Prueba de Tukey de la variación de la reducción de la DBO₅

| Reducción de DBO ₅ | | | |
|-------------------------------|---|--------|---------|
| HSD Tukey ^a | | | |
| Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
| TRATAMIENTOS | N | 1 | 2 |
| CONTROL | 6 | 2,4033 | |
| TRATAMIENTO 3 | 6 | | 38,4633 |
| TRATAMIENTO 1 | 6 | | 45,0950 |
| TRATAMIENTO 2 | 6 | | 48,8867 |
| Sig. | | 1,000 | ,789 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

APÉNDICE 6

Prueba de Tukey de la variación de la remoción del plomo

| Remoción de plomo | | | |
|------------------------------|---|---------|------|
| HSD Tukey ^a | | | |
| Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
| TRATAMIENTOS | N | 1 | |
| CONTROL | 6 | 25,6817 | |
| TRATAMIENTO 3 | 6 | 35,0300 | |
| TRATAMIENTO 1 | 6 | 40,6550 | |
| TRATAMIENTO 2 | 6 | 52,0450 | |
| Sig. | | | ,142 |

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

APÉNDICE 7

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua (Decreto Supremo N° 004-2017): Parámetros fisicoquímicos para la CATEGORIA 4

| Parámetros | Unidad de medida | E1: Lagunas y lagos | E2: Ríos | | E3: Ecosistemas costeros y marinos | |
|---|------------------------------|---------------------|----------------|-----------|------------------------------------|-----------|
| | | | Costa y sierra | Selva | Estuarios | Marinos |
| FÍSICOS- QUÍMICOS | | | | | | |
| Aceites y Grasas (MEH) | mg/L | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| Cianuro Libre | mg/L | 0,0052 | 0,0052 | 0,0052 | 0,001 | 0,001 |
| Color (b) | Color verdadero Escala Pt/Co | 20 (a) | 20 (a) | 20 (a) | ** | ** |
| Clorofila A | mg/L | 0,008 | ** | ** | ** | ** |
| Conductividad | (μ S/cm) | 1 000 | 1 000 | 1 000 | ** | ** |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L | 5 | 10 | 10 | 15 | 10 |
| Fenoles | mg/L | 2,56 | 2,56 | 2,56 | 5,8 | 5,8 |
| Fósforo total | mg/L | 0,035 | 0,05 | 0,05 | 0,124 | 0,062 |
| Nitratos (NO ₃) (c) | mg/L | 13 | 13 | 13 | 200 | 200 |
| Amoniaco Total (NH ₃) | mg/L | (1) | (1) | (1) | (2) | (2) |
| Nitrógeno Total | mg/L | 0,315 | ** | ** | ** | ** |
| Oxígeno Disuelto (valor mínimo) | mg/L | ≥ 5 | ≥ 5 | ≥ 5 | ≥ 4 | ≥ 4 |
| Potencial de Hidrógeno (pH) | Unidad de pH | 6,5 a 9,0 | 6,5 a 9,0 | 6,5 a 9,0 | 6,8 – 8,5 | 6,8 – 8,5 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | ≤ 25 | ≤ 100 | ≤ 400 | ≤ 100 | ≤ 30 |
| Sulfuros | mg/L | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Temperatura | °C | Δ 3 | Δ 3 | Δ 3 | Δ 2 | Δ 2 |

APÉNDICE 8

Registro fotográfico de la investigación

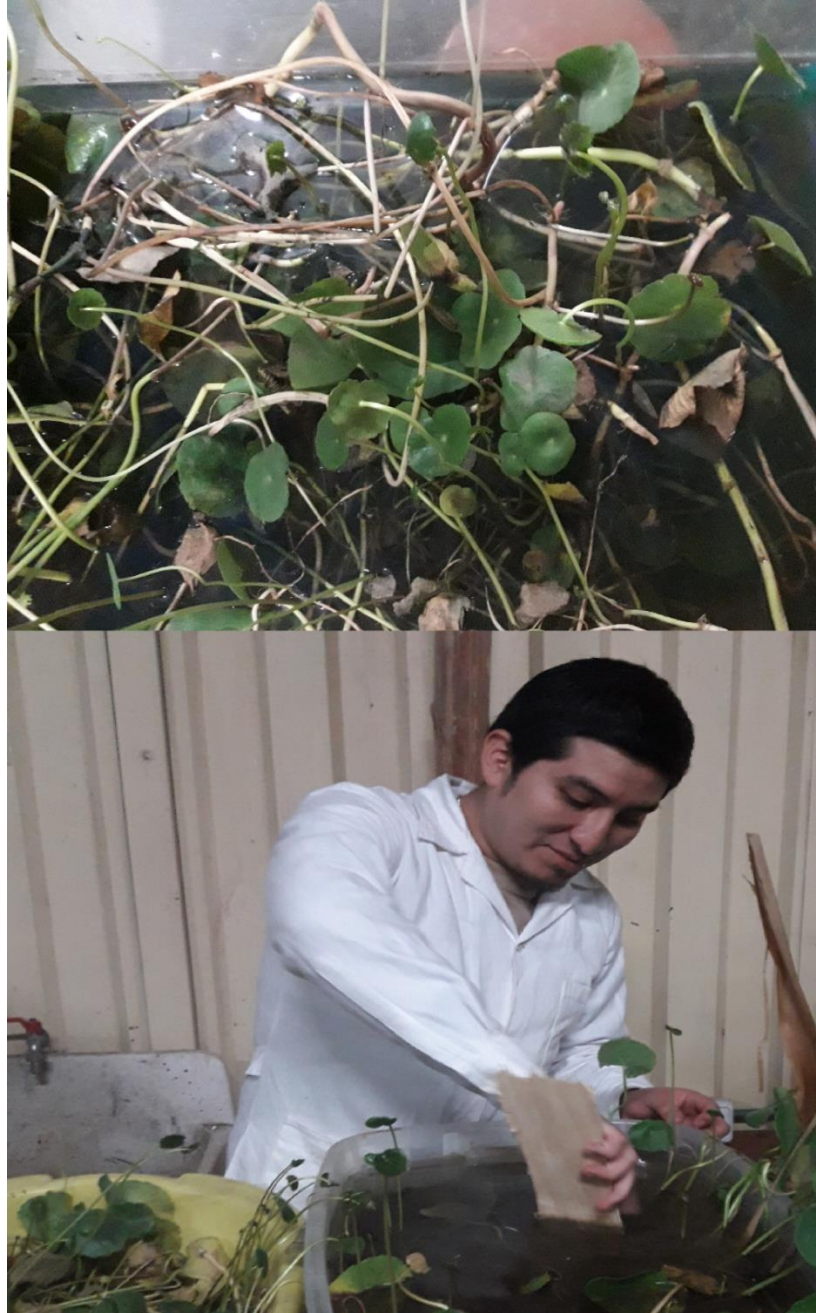
Fotografía 8.1 Acondicionamiento de plantas de *Typha latifolia* en los humedales artificiales.



Fotografía 8.2 Establecimiento de las unidades experimentales conformado por humedales artificiales (*Typha latifolia*)



Fotografía 8.3 Establecimiento de las unidades experimentales conformado por humedales artificiales (*H. bonariensis*)



Fotografía 7.4 Determinación de los parámetros fisicoquímicos (Plomo, nitrógeno total, fósforo total y DBO)

