



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE TRES HUMEDALES ARTIFICIALES
SUBSUPERFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS, 2021

Línea de investigación:
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autora

Celestino De Paz, Greys

Asesor

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado

César Minga, Julio

Altez Rodríguez, José Félix

Naupay Vega, Marlitt

Lima - Perú

2025



EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE TRES HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, 2021.

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	5%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
3	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.unfv.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1%
7	revistatyca.org.mx Fuente de Internet	<1%
8	1library.co Fuente de Internet	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENTRE TRES HUMEDALES ARTIFICIALES
SUBSUPERFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS, 2021

Línea de investigación:

Tecnología para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional Ingeniero Ambiental

Autora:

Celestino De Paz, Greys

Asesor:

Vásquez Aranda, Ahuber Omar
ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado:

César Minga, Julio
Altez Rodríguez, José Félix
Naupay Vega, Marlitt

Lima – Perú

2025

Dedicatoria

A Dios, por ser la luz que guía mi vida y por darme la fortaleza en cada momento de este camino.

A mis padres, Juan y Judith, por su amor incansable y sacrificio. Gracias por creer en mí, por apoyarme en cada decisión y por enseñarme, desde siempre que, con esfuerzo y determinación, todo es posible.

A mis hijos, Emilia y Piero, quienes son mi inspiración diaria y la razón de cada uno de mis esfuerzos. Gracias por llenarme de amor y alegría, por darme la motivación para seguir adelante y recordarme lo hermoso de la vida.

A mi esposo, Renato, mi compañero de vida y mi mayor apoyo, quien ha estado conmigo en cada paso, celebrando mis logros y alentándome en los momentos difíciles. Gracias por tu paciencia, comprensión y amor incondicional.

A mi hermano, Renzo, mi amigo y guía, por ser ejemplo de perseverancia y fuerza. Gracias por tu compañía en cada momento y por mostrarme, con cada paso, el valor de no rendirse.

Agradecimiento

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional Federico Villareal (UNFV), y a la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo (FIGAE), por haberme acogido y permitido crecer académica y personalmente, rodeado de profesionales de excelencia que han sido fundamentales en mi formación.

Al Mg. Omar Vásquez Aranda, por su dedicación, tiempo y profesionalismo, y por brindarme su apoyo constante y orientación a lo largo de todo el proceso de esta tesis. Su paciencia y compromiso han sido claves en este logro.

A mi familia —mis padres, hermano, esposo e hijos— por ser mi fuerza y motivación. A ustedes, que, con sus palabras de aliento y fe en mí, me impulsaron a seguir adelante en cada momento. Gracias por su amor incondicional y su confianza, que han sido el motor para alcanzar esta meta.

Infinitas gracias a todos ustedes.

ÍNDICE

RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Descripción y formulación del problema	14
1.2.1. <i>Problema General</i>	16
1.2.2. <i>Problemas Específicos</i>	17
1.2. Antecedentes.....	17
1.2.1 <i>Antecedentes Nacionales</i>	17
1.2.2 <i>Antecedentes Internacionales</i>	20
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	21
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	21
1.4. Justificación.....	22
1.5. Hipótesis	23
1.5.1 <i>Hipótesis General</i>	23
1.5.2 <i>Hipótesis Específicas</i>	23
II. MARCO TEÓRICO	24
2.1. Bases teóricas	24
2.1.1. <i>Aguas residuales</i>	24
2.1.2. <i>Generación y caracterización de las aguas residuales</i>	24

	5
2.1.3. <i>Composición de las aguas residuales</i>	25
2.1.4. <i>Tipos de aguas residuales</i>	26
2.1.5. <i>Tratamientos de aguas residuales</i>	27
2.1.6. <i>Humedales artificiales</i>	28
2.1.7. <i>Cualidades de los humedales artificiales</i>	30
2.1.8 <i>Componentes de los Humedales Artificiales</i>	366
2.1.9. <i>Procesos de tratamiento de los humedales artificiales</i>	37
2.1.10. <i>Aplicaciones de los humedales artificiales</i>	388
2.1.11. <i>Efectos ecotoxicológicos</i>	40
2.2. Marco Conceptual.....	42
2.3. Marco Legal.....	43
2.3.1. <i>Ley n.º 28611.- Ley General del Ambiente</i>	43
2.3.2. <i>Ley N° 29338.- Ley de Recursos Hídricos</i>	44
2.3.3. <i>Reglamento de la Ley N° 29338.</i>	44
2.3.4. <i>Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda</i>	45
2.3.5. <i>Norma OS-090: Planta de Tratamiento de Agua Residual</i>	45
2.3.6. <i>Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.</i>	45
2.3.7. <i>Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.</i>	46
III. MÉTODO	47
3.1 Tipo de investigación	47
3.2 Ámbito Temporal y Espacial.....	47

3.3	Variables.....	48
3.3.1.	<i>Variable Independiente.....</i>	48
3.3.2.	<i>Variable Dependiente.....</i>	48
3.4	Población y Muestra.....	49
3.4.1.	<i>Población.....</i>	49
3.4.2.	<i>Muestra.....</i>	49
3.5	Instrumentos.....	50
3.5.1.	<i>Técnica.....</i>	53
3.5.2.	<i>Instrumentos utilizados en la investigación.....</i>	53
3.5.3.	<i>Equipos y Materiales.....</i>	53
3.6	Procedimiento.....	53
3.6.1.	<i>Caracterización del agua residual a tratar.....</i>	53
3.6.2.	<i>Procedimiento para diseño del humedal artificial.....</i>	53
3.6.3.	<i>Construcción de los humedales artificiales.....</i>	56
3.6.4.	<i>Implementación de sustratos y especies.....</i>	58
IV.	RESULTADOS.....	61
4.1	Caracterización del Agua Residual.....	61
4.2	Niveles de erradicación de los parámetros fisicoquímicos.....	62
4.2.1	<i>Indicadores Fisicoquímicos en el tratamiento de Aguas. Domésticas.....</i>	64
4.3	Eficiencias alcanzadas por cada sistema de tratamiento.....	75
4.3.1	<i>Eficiencias Alcanzadas para Turbiedad.....</i>	76

4.3.2 Eficiencias Alcanzadas para Sólidos Suspendidos Totales	77
4.3.3 Demanda Química de Oxígeno.....	79
4.3.3 Eficiencias Alcanzadas pr la Demanda Bioquímica de Oxígeno	79
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
VI. CONCLUSIONES	84
VII. RECOMENDACIONES	86
VIII. REFERENCIAS	87
IX. ANEXOS	94
ANEXO A. Matriz de Consistencia.....	94
ANEXO B. Panel Fotográfico	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición promedio de agua residual doméstica.....	25
Tabla 2 Reactivos químicos utilizados en el tratamiento activo de aguas residuales .	27
Tabla 3 Tecnologías pasivas para el tratamiento de aguas residuales	28
Tabla 4 Proceso de la remoción de los contaminantes en humedales artificiales.....	37
Tabla 5 Eficiencia de los humedales artificiales de acuerdo con la etapa de tratamiento	39
Tabla 6 Límite Máximo Permisible para efluentes de PTAR.....	46
Tabla 7 Límite Máximo Permisible para efluentes de PTAR.....	46
Tabla 8 Variable independiente	48
Tabla 9 Variable dependiente	49
Tabla 10 Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial.....	54
Tabla 11 Resultados iniciales de la caracterización del agua residual doméstica.	61
Tabla 12 Resultados fisicoquímicos para 5 días de tratamiento.	62
Tabla 13 Resultados fisicoquímicos para 10 días de tratamiento	62
Tabla 14 Resultados fisicoquímicos para 15 días de tratamiento.	63
Tabla 15 Resultados fisicoquímicos para 20 días de tratamiento	63
Tabla 16 Resultados fisicoquímicos para 25 días de tratamiento	63
Tabla 17 Resultados fisicoquímicos para 30 días de tratamiento	64
Tabla 18 Resultados fisicoquímicos para 45 días de tratamiento	64
Tabla 19 Datos de la muestra analizada.....	73
Tabla 20 Resultados obtenidos del análisis.....	73
Tabla 21 Composición típica del agua residual doméstica bruta.....	73
Tabla 22 Eficiencias alcanzadas para Turbiedad	75
Tabla 23 Eficiencias alcanzadas para Solidos Suspendidos Totales.....	77

Tabla 24 Eficiencias alcanzadas para la Demanda Química de Oxígeno 79

Tabla 25 Eficiencias alcanzadas para la Demanda Bioquímica de Oxígeno 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento de un humedal.....	29
Figura 2. Clasificación de humedales artificiales por el tipo de flujo.....	31
Figura 3. Clasificación de humedales artificiales por uso de las plantas macrófitas .	31
Figura 4. Humedales artificiales de Flujo Superficial.....	32
Figura 5. Sistemas de humedales artificiales superficiales con macrófitas.	33
Figura 6. Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.	34
Figura 7. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical.	35
Figura 8. Utilización de los humedales artificiales en distintas etapas del tratamiento de aguas residuales.....	39
Figura 9. Conexiones para la salida del contenedor hacia los humedales.	56
Figura 10 Conexiones para el ingreso de agua hacia los humedales.	57
Figura 11 Instalación de las mangueras a través de abrazaderas metálicas e instalación del push de salida de agua residual.	57
Figura 12. Sistema de humedales artificiales con 3 salidas.	58
Figura 13. Implementación de la piedra chancada.....	58
Figura 14. Implementación de la arena gruesa y fina.	59
Figura 15. Vista frontal de los niveles de sustratos implementados en humedales. ..	59
Figura 16. Distribución de las especies en los diferentes humedales.	60
Figura 17. Resultados de pH para los tres sistemas de tratamiento	65
Figura 18. Resultados de la Conductividad Eléctrica para los tres sistemas de tratamiento.....	66
Figura 19. Resultados de los Solidos Totales Disueltos para los tres sistemas de tratamiento.....	67
Figura 20. Resultados de Turbiedad para los tres sistemas de tratamiento.	68

Figura 21. Resultados de Solidos Suspendidos Totales	69
Figura 22. Resultados de Salinidad de los 3 humedales.	70
Figura 23. Resultados de la Demanda Química de Oxígeno	71
Figura 24. Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno	72

RESUMEN

Se conoce que las cualidades de las aguas residuales domésticas, a nivel de calidad, no cumple los estándares para ser esparcidos en los cuerpos receptores o rehusarse en otros procesos productivos, causa por la cual se aplican diversos tratamientos, con el fin de cumplir con las normativas vigentes. Es así como para colaborar con esta problemática, esta investigación tuvo como objetivo principal de la investigación basándose en evaluar la eficiencia entre 3 humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas para remover concentraciones de Turbiedad, SST, DQO y DBO. Para conseguir el objetivo se diseñó humedales artificiales con 3 sistemas constituidos con Arena (gruesa y fina), piedra chancada y tierra de chacra, para remover los valores iniciales de Turbiedad 200 NTU, DQO 1290 mg/l, SST 137 mg/L y DBO 625 mg/l a fin de obtener la mayor eficiencia de erradicación. Los resultados obtenidos indicaron que para remover estos parámetros el tiempo más eficiente fue 45 días con el sistema H3 logrando así remociones de 96.67% para Turbiedad, 92.7% para SST, 100% para DQO y 100% para DBO respectivamente. Concluyéndose que el tratamiento con humedales artificiales posee una elevada eficiencia para la erradicación de estos parámetros presentes en diferentes efluentes industriales domésticos.

Palabras Clave: humedales artificiales, tratamiento, aguas residuales

ABSTRACT

It is known that the characteristics of domestic wastewater, at the quality level, do not meet the standards to be spread in the receiving bodies or to be reused in other productive processes, which is why various treatments are applied, in order to comply with current regulations. Thus, in order to collaborate with this problem, this research had as its main objective based on evaluating the efficiency between 3 subsurface artificial wetlands for the treatment of domestic wastewater to remove concentrations of Turbidity, TSS, COD and BOD. To achieve the objective, artificial wetlands were designed with 3 systems consisting of Sand (coarse and fine), crushed stone and farm soil, to remove the initial values of Turbidity 200 NTU, COD 1290 mg / l, TSS 137 mg / L and BOD 625 mg / l in order to obtain the highest removal efficiency. The results obtained indicated that the most efficient time to remove these parameters was 45 days with the H3 system, thus achieving removals of 96.67% for Turbidity, 92.7% for TSS, 100% for COD and 100% for BOD respectively. It was concluded that treatment with artificial wetlands has a high efficiency for the removal of these parameters present in different domestic industrial effluents.

Keywords: artificial wetlands, treatment, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción y formulación del problema

De acuerdo las estadísticas mundiales, cada año se extraen 3928 km³ de agua dulce, de los cuales 1716 km³ (44%) son consumidos por el sector agrícola, a través del proceso de evaporación que se genera durante la irrigación de tierras de cultivo; y 2212 km³ (56%) son expulsados al medio ambiente a través de efluentes de origen industrial y municipal. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2017).

El volumen de agua que utilizamos para actividades domésticas ha aumentado más del 80%, descargándose como aguas contaminadas que son evacuadas de manera directa sobre los cuerpos de agua (arroyos, océanos y ríos), causando severos daños al ambiente y la contaminación de las fuentes de agua que lo vuelve insano para el consumo humano (Baeza, 2018).

Ante ello, el Banco Mundial (2020) atestigua que el 80 % de las aguas residuales que la sociedad produce son vertidas al medio ambiente sin el tratamiento adecuado; esto quiere decir que, estas aguas se extraen, utilizan y son devueltas en un estado de contaminación a los ríos.

De acuerdo con un estudio de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2020), en el Perú existen 1768.172 km³ de agua que representa el 1.89% del agua dulce a nivel mundial, de los cuales 44.20 km³ de agua es consumible por el ser humano; donde sólo es 79.2% de aguas residuales descargadas de los procesos a nivel nacional fueron tratadas por EPS.

Si la situación persiste, se tiene como expectativa que la contaminación se potencie y extienda, generando daños al ambiente y a todos los seres vivos de forma permanente. De acuerdo la información publicada por la Dirección de Gestión de Calidad de los recursos hídricos del ANA, el Perú pasará de tener una población de 29 millones de habitantes a una de

45 millones para el año 2050; por lo cual, se presume que se originará una mayor producción de aguas residuales de origen doméstico. De igual manera, se hipotetiza que gran cantidad de estas aguas serán vertidas sin ser sometidas a un tratamiento previo. Además, este mismo organismo señala que la producción de aguas residuales alcanza los 960.5 MMC/año (30 H3/s); aproximadamente el 20.62 % pasa por un tratamiento de aguas primario y secundario (198 MMC/año) y el 79.38 % son vertidos directamente al océano, río, lagos y otros cuerpos de agua (761 MMC/año). (ANA, s.f.).

Las aguas contaminadas son unas fuentes altamente asequibles y sostenibles de agua, energía, nutrientes, materia orgánica y otros subproductos útiles. Según Raschid-Sally & Jayakody (2008), son consideradas como una combinación de los siguientes efluentes: aguas domésticas que se encuentran compuestas y divididas en aguas negras y aguas grises, aguas de establecimientos comerciales e instituciones. Según Cabral (2010) y Trapote (2016), estas se caracterizan por presentar ciertos parámetros y concentraciones promedio como los que serán ilustrados a continuación: sólidos (con concentraciones de 350 a 1200 mg/L de sólidos totales), materia orgánica (con concentraciones de 250 a 1000 mg/L de DQO, y 110 a 400 mg/L de DBO5, nutrientes (con concentraciones de 20 a 85 mg/L de nitrógeno total, y 15 a 4 mg/L de fósforo total), y patógenos (con concentraciones de 10^4 a 10^6 células/mL de coliformes totales, y de 10^3 a 10^5 células/mL de coliformes fecales, CF).

La descarga de aguas residuales que no hayan sido sometidas a un tratamiento previo al vertimiento de estas origina impactos negativos en el ambiente tales como el daño de ecosistemas acuáticos, la disminución de la biodiversidad, la acumulación de toxinas, así como la intensificación de las emisiones de gases de efecto invernadero. También impacta negativamente en las actividades productivas, como la disminución de la productividad de origen agrícola e industrial, así como en la salud del ser humano por medio del incremento de enfermedades infecciosas. (Mateo-Sagasta, 2017)

En la actualidad, los sistemas de tratamiento de aguas contaminadas de la urbe enfrentan desafíos debido al aumento de la población en las últimas décadas, lo que ha llevado a la saturación de las plantas existentes. Además, los altos costos de inversión, operación y mantenimiento han contribuido a esta problemática. Por otro lado, muchas localidades más pequeñas y aisladas aún carecen de sistemas de tratamiento de aguas residuales, optando por soluciones como fosas sépticas o pozos absorbentes en áreas rurales.

Varios estudios sobre el tratamiento de estas aguas destacan la biofiltración como una de las técnicas más prometedoras. Esta tecnología implica el uso de materiales orgánicos como medio filtrante (como paja, pasto, madera, turba, etc.) dispuestos en una columna vertical. La "cama" formada por estos materiales suele tener propiedades altas de porosidad, adsorción y absorción, lo que la hace efectiva en la eliminación de contaminantes. Además, la biofiltración se destaca por su bajo costo de implementación y operación. (Garzón, 2004)

De acuerdo con el estudio de ecoeficiencia realizado por Abello-Passteni et al. (2020), la biofiltración es la tecnología de tratamiento más ecoeficiente, para el indicador en términos de cambio climático y eutrofización de agua dulce, en comparación con tecnologías como lagunas aireadas y lodos activos.

Por tal motivo, y, como ha sido mencionado en párrafos anteriores, en esta investigación se ha establecido como motivo de estudio el indagar la eficiencia entre tres humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

1.1.1. Problema General

¿Cuál será la eficiencia entre tres humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas?

1.1.2. Problemas Específicos

- ❖ ¿Cómo se encontrarán las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual, antes del tratamiento con humedales artificiales subsuperficiales?
- ❖ ¿Cómo es la eficiencia de cada humedal artificial subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas?
- ❖ ¿Cómo se encontrarán las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos con relación a los límites máximos permisibles, después del tratamiento con humedales artificiales subsuperficiales?

1.2. Antecedentes

1.2.1 Antecedentes Nacionales

Ramírez y Paredes (2019), en su investigación titulada "Evaluación de dos especies macrófitas, *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*, en la erradicación de contaminantes microbiológicos y químicos a través de un sistema de biofiltro en aguas residuales domésticas", el objetivo principal fue analizar el potencial de dos especies de plantas acuáticas flotantes, *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*, para eliminar contaminantes de origen microbiológico y químico mediante un sistema de biofiltro aplicado a aguas residuales domésticas. Para ello es importante mencionar que los autores decidieron llevar a cabo un diseño de estudio cuasi experimental, utilizando evaluaciones poco convencionales. Durante el proceso, se llevaron a cabo un total de 8 tomas de muestras, y después de los análisis de laboratorio a los cuales fueron sometidas, se encontró que *Pistia stratiotes* mostró la mayor eficiencia en la erradicación de parámetros químicos, con un promedio total de erradicación del 81.008%. Por otro lado, *Eichhornia crassipes* demostró ser más eficaz en la erradicación de parámetros microbiológicos, logrando un promedio total de erradicación del 99.9%. La conclusión que se obtuvo fue al aplicar un sistema de biofiltro constituido por estratos filtrantes y las especies de macrófitas acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* se demostró la eficiencia para

eliminar los contaminantes microbiológicos y químicos pertenecientes a las aguas de las muestras.

Cotrina et al. (2019) en su estudio de investigación titulado "Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un sistema de biofiltro a base de conchas de abanico (*Argopecten purpuratus*) en el poblado de San Andrés de Huacar, Distrito de Paccho - Huaura", la finalidad evaluar cómo la creación de un biofiltro que se encuentre creado a base conchas de abanico (*Argopecten Purpuratus*) podría optimizar el tratamiento de aguas residuales domésticas de una comunidad perteneciente a la zona mencionada en el título de la investigación. Además, se esperaba que esta optimización reflejara la mejora de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y la carga orgánica. Es por ello que el diseño de la investigación fue experimental, evaluando el sistema construido de manera que la gravedad y el material aplicado contribuyan a la mejora de las aguas residuales, en esta se evaluaron los siguientes tiempos: T1-15 min, T2-30 min y T3-45 min. Los resultados mostraron que, para los parámetros de origen fisicoquímico se obtuvieron datos como los siguientes: la temperatura se mantuvo a 20°C y el pH entre 12 y 13, mientras que los sólidos en suspensión totales (SST) se redujeron en un 56.17%, DBO5 en un 82.73%, DQO en un 78.62%, y la conductividad eléctrica disminuyó de T1-15 a T3-45, concluyendo que el T2-30 mostró los mejores resultados. Respecto a los metales pesados, se observó una reducción del 37.3% para el cobre, 64% para el zinc, 87.4% para el cadmio, 40.4% para el plomo, 64% para el hierro y 28.1% para el arsénico, aunque los tres últimos elementos excedieron los ECA. En cuanto a los coliformes totales, se registraron 67 UFC/100 ml en la muestra inicial y 0 UFC/100 ml en el T3-45. Se concluye que este sistema de biofiltro basado en conchas de abanico para el tratamiento de estas aguas resulta ser una alternativa para mitigar los impactos ambientales y los riesgos para la salud pública, además de ser un método de reutilización de residuos marinos.

Quispe (2018), en su investigación titulada "Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica" (Quispe, 2018), que tuvo como finalidad del estudio el lograr definir la efectividad entre dos sistemas pilotos de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales por medio del análisis de parámetros de origen fisicoquímico y microbiológico a fin de optimizar la calidad de esta. Ahora, con relación a la parte metodológica, es importante señalar que el diseño del estudio fue experimental de tipo aplicativo, con un enfoque de tipo cuantitativo y el método de la investigación científica fue empírico de muestreo no probabilístico. Por su parte, los hallazgos obtenidos de los parámetros que se especificaron para ser evaluados tales como los SST, DBO5, NO3, NO2, PO4-3 y CT, fueron registrados durante un período de 5 semanas, entre los meses de mayo y junio. Luego, se sometieron a análisis 25 muestras obtenidas de los cinco puntos de muestreo logrando encontrar hallazgos tales como que el primer sistema es más eficiente en la remoción de SST, DBO5 y CT con valores de 95.71%, 91.55% y 99.87%. La conclusión obtenida del estudio fue el primer sistema (SB1) mostró una mayor eficiencia en relación a la remoción de contaminantes, este empleó la especie *Eichhorniacrassipes* y a diferencia del SB2 estuvo compuesta por los mismos equipos y un humedal de flujo subsuperficial vertical.

Egoavil (2018), en su trabajo de tesis titulado "Implementación de humedal artificial en el tratamiento de agua residual doméstica del proyecto Don Javier 79, Yarabamba – Arequipa", el objetivo principal fue implementar un humedal artificial de flujo subsuperficial en el sistema de tratamiento de agua residual doméstica (ARD) del proyecto Don Javier 79, con el fin de optimizarlo y agregar un tratamiento secundario que garantizara el cumplimiento de los LMP. Se llevó a cabo la comparación de los parámetros de origen fisicoquímico y microbiológico de las muestras obtenidas para el estudio en un periodo de tiempo de siete

meses con los LMP, constituyendo así dos momentos: previo al accionamiento del humedal y posterior al accionamiento de este y a la evaluación del ARD. Para finalizar, el autor concluye que este tipo de tratamiento ha demostrado su capacidad de mejorar significativamente el ARD cuya eficiencia se demuestra en la reducción del nivel de los contaminantes hasta en 98.3%.

1.2.2 Antecedentes Internacionales

Tapia (2019), en su estudio titulado "Implementación de un Biofiltro para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Granja Porcina 'Ángel María'"; por ello, se elaboró un biofiltro dinámico aeróbico con la finalidad de conocer si este tratamiento podría lograr la remoción los contaminantes presentes en el agua residual porcina. De igual manera, se decidió llevar a cabo análisis de aguas tanto en el agua potable utilizada para la limpieza como en el agua residual porcina y en el agua tratada mediante el biofiltro. Estos análisis se realizaron en tres momentos diferentes: a los 15, 30 y 60 días después de estabularse los cerdos. Los resultados mostraron que el biofiltro logró reducir significativamente los niveles de contaminación en los parámetros evaluados. Por ejemplo, se observó una reducción del 99% en coliformes fecales, del 77.1% en sólidos totales, del 86% en sólidos disueltos, del 45.6% en sólidos suspendidos totales, del 26.4% en nitratos, del 67.7% en DQO y del 73.8% en DBO5. Además, se observó que el pH tendió a la neutralidad y que la conductividad eléctrica aumentó en un 49.3%. Estos hallazgos fueron comparados con los límites de descarga establecidos en la normativa ambiental pertinente. Se concluyó que el biofiltro fue capaz de disminuir los contaminantes en el agua residual porcina a un costo menor que los tratamientos convencionales.

Navarro et al. (2013), en su investigación titulada "Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas", cuyo

objetivo fue someter a un tratamiento al agua resultante del pelado de vegetales de una empacadora situada en Atlixco por medio de la creación de un sistema de humedales de flujo subsuperficial horizontal. Este se encontró trabajando por semilotes, con un tiempo de residencia hidráulica en cada celda correspondiente a cinco días. Además, es relevante señalar que este sistema estaba compuesto por los siguientes elementos: sedimentador, celda con grava de río plantada con *Phragmites australis*, dos celdas paralelas con grava y piedra volcánica plantadas con *Typha latifolia*. Ahora, con relación a los resultados obtenidos gracias a la fase experimental, se destaca lo siguiente: se obtuvo un alto porcentaje de reducción de la DQO/DBO que fue de 77/48 con altas cargas orgánicas del agua residual ($DBO > 2000 \text{ mg L}^{-1}$) y de 92/94 con bajas cargas ($DBO < 1200 \text{ mg L}^{-1}$). De igual manera, otros parámetros que fueron sometidos a análisis (pH, conductividad eléctrica, potencial redox, NO_2^- , NO_3^- y NH_4^+) lograron obtener valores aceptables a la salida del sistema. Para finalizar el resumen de este estudio, los autores llegaron a la conclusión de que el tratamiento en el humedal de flujo subsuperficial optimiza las cualidades organolépticas del agua residual y lleva el pH a obtener valores muy cercanos a la neutralidad.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia entre tres humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

❖ Determinar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual, antes del tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales.

- ❖ Determinar la eficiencia de cada humedal artificial subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
- ❖ Comparar los límites máximos permisibles con las concentraciones finales obtenidas en el tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales.

1.4. Justificación

La investigación actual aborda la creciente necesidad de tratar las aguas residuales, a pesar de los esfuerzos realizados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las cuales aún no logran abarcar todos los efluentes. Esta situación impulsa la exploración de nuevas alternativas de tratamiento que sean naturales, ecoeficientes y respetuosas con el medio ambiente. La propuesta de esta investigación se centra en la utilización de humedales artificiales (wetlands) como una alternativa para mejorar la calidad del agua, contribuyendo así al bienestar de la población y a la conservación de los recursos naturales.

Es así como este trabajo de investigación pretende evidenciar que al implementar los humedales artificiales de tipo flujo subsuperficial, se puede constituir como una alternativa que se caracteriza por ser eficiente y relativamente económica cuando se indaga sobre la temática de tratamiento de aguas contaminadas. Es por ello que la tecnología brinda ventajas a nivel de espacio para la operación y costos reducidos en relación a los procedimientos de construcción, operación y mantenimiento. Es aquí donde resulta importante mencionar que la presencia de plantas de origen acuático, un medio filtrante (sustrato) y microorganismos en estos humedales logran facilitar la degradación de la materia orgánica en las aguas residuales, lo cual, a su vez, ha demostrado alcanzar reducciones significativas de las concentraciones de los contaminantes.

Asimismo, el estudio que se estructurará a continuación tiene como objetivo principal el proponer una alternativa dentro del abanico de tratamientos biológicos en zonas geográficas que tienen como característica la ausencia de sistemas de tratamiento convencionales, de esta manera mejorar la calidad de vida de la población y reducir la contaminación en los cuerpos

de agua donde principalmente las aguas residuales son vertidas directamente (sin tratamiento), afectando la salud de la población a través de enfermedades.

1.5. Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

El humedal artificial HS1 será más eficiente que el humedal artificial HS2 para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- ❖ Las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual después del tratamiento de humedales artificiales subsuperficial, con respecto al inicial, será inferior.
- ❖ El diseño de los humedales artificiales subsuperficiales influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales domésticas
- ❖ Los resultados de la calidad del efluente después del tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales no exceden a las normas ambientales vigentes.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas

2.1.1. Aguas residuales

Las aguas residuales de acuerdo a lo definido por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014), son aguas cuyas cualidades han sido alteradas por las distintas actividades del hombre, y que necesitan tratamiento antes de ser reusadas o vertidas en algún medio, por su baja calidad. Asimismo, según (López y Martín, 2015) este término hace referencia al agua que no posee valor inmediato para el fin para el que se utilizó, debido a la calidad que posee cuando se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de una persona pueden servir de suministro para otro usuario.

2.1.2. Generación y caracterización de las aguas residuales

De acuerdo con lo indicado por la UNESCO (2017), el deterioro de la calidad del agua puede reducir su uso en los procesos, ya que la disponibilidad del agua está relacionada estrechamente con su calidad. Asimismo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013), considera que la producción de aguas residuales está sujeta al crecimiento poblacional y sus costumbres, crecimiento económico y patrones de consumo.

Con base en Oalkey (2011), en Latinoamérica, se calcula que de los 18,98 km³ de agua residuales que se generan al año, solo el 6% atraviesa por un tratamiento adecuado antes de su vertimiento. Desde el punto de vista de Díaz (2012), las aguas residuales domésticas se constituyen por aguas derivadas de la cocina, lavandería y otras actividades metabólicas humanas. Asimismo, está constituida de la siguiente manera: 99,9% de agua y 0,1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos.

Por otro lado, Mara (2013) sustenta que las aguas residuales están compuestas por un 70% de porción orgánica (proteínas, carbohidratos y grasas) y un 30% de inorgánica (detritos,

minerales, sales, metales). Teniendo en cuenta a Vera (2012), es preciso indicar que el volumen y la concentración de las aguas residuales se encuentran en una relación directa con factores tales como su procedencia, origen y componentes.

2.1.3. Composición de las aguas residuales

La composición del agua residual tiende a ser definida en base a la agrupación de parámetros físicos, químicos y biológicos, los cuales son determinados por medio de la realización de pruebas de laboratorio. Estos análisis son fundamentales para comprender la calidad del agua residual y diseñar sistemas de tratamiento adecuados para su erradicación y/o reducción. (Osorio et al., 2011)

De acuerdo con Vera (2012), las cualidades físicas utilizadas para evaluar el nivel de impurezas en el agua residual pueden ser sometidas a una medición a través de propiedades organolépticas tales como la temperatura, el color, el olor, entre otros. En lo que respecta a las cualidades químicas, se consideran parámetros como la DQO y DBO5, además del contenido de nutrientes presentes en diversas formas de nitrógeno, como el NT, N-Orgánico, NTK, NO₂⁻, NO₃⁻ y NH₄⁺, así como las diferentes formas de fósforo, como el Fósforo total (PT), los Fosfatos (PO₄-3) y el Fósforo orgánico (P-Orgánico). En relación a los parámetros biológicos, se identifican organismos patógenos medibles mediante indicadores como los coliformes totales (CT) y los coliformes fecales (CF). En la *Tabla 1* se proporciona la composición promedio del agua residual doméstica.

Tabla 1

Composición promedio de agua residual doméstica

Parámetros [mg/L]	Grado de contaminación		
	Baja	Media	Alta
Sólidos totales	200 – 350	500 – 720	1000 – 1200
Sólidos totales fijos	80 – 130	150 – 300	300 – 600
Sólidos totales volátiles	120 – 170	200 – 400	600 – 700
Sólidos en suspensión	100	200 – 300	350 – 500

Sólidos en suspensión fijos	20 – 30	50	75 – 100
Sólidos en suspensión volátiles	70	150 – 250	275 – 400
Sólidos disueltos	100 – 250	200 – 500	500 – 850
Sólidos disueltos fijos	50 – 145	100 – 300	200 – 525
Sólidos disueltos volátiles	50 – 105	100 – 200	300 – 325
Sólidos sedimentables	40	180	250
Sólidos sedimentables fijos	25	110	150
Sólidos sedimentables volátiles	15	70	100
DBO ₅	100 – 110	200 – 220	300 – 400
DQO	160 – 250	450 – 500	800 – 1000
Oxígeno disuelto	0.2	0.1	0
Aceites y grasas	50	100	150
Nitrógeno total	20 – 25	40 – 50	85 – 90
Amonio	12 – 15	25 – 30	50
Nitrito	0	0 – 0.05	0.05 – 0.10
Nitratos	0.10	0.20	0.40
Fósforo total	2 – 6	7 – 10	15 – 20
Fósforo orgánico	1 – 2	3	5
Fósforo inorgánico	3 – 4	5 – 7	10 – 15
Alcalinidad (CaCO ₃)	50	100	200
pH	6 – 9	6 – 9	6 – 9
Coliformes totales [NMP/100mL]	<10 ⁸	10 ⁸ - 10 ⁹	>10 ⁹

Nota: Tejedor (2019)

2.1.4. Tipos de aguas residuales

De acuerdo con el OEFA (2014), las aguas residuales pueden ser clasificadas, dependiendo la procedencia, en 3 tipos:

2.1.4.1. Aguas residuales industriales. Se entiende como aquellas que son vertidas después de los procesos productivos, de distintos sectores como la minería, agricultura, energía, agroindustria, entre otras.

2.1.4.2. Aguas residuales domésticas: Son aquellas cuyo origen es residencial y comercial donde se evidencian desechos fisiológicos, entre otros, resultantes de la actividad humana, y deben ser dispuestas apropiadamente.

2.1.4.3. Aguas residuales municipales: Se pueden definir como el resultado obtenido por medio de la integración de las aguas residuales domésticas y las aguas de drenaje pluvial,

así como también con aguas residuales de origen industrial tratadas, que luego son vertidas en un sistema de alcantarillado.

2.1.5. Tratamientos de aguas residuales

Los tratamientos de aguas residuales consisten en procedimientos de origen físico, químico y biológico que tienen la finalidad de erradicar los elementos contaminantes presentes en el agua. Se dividen en dos, tratamiento activo y pasivo:

2.1.5.1. Tratamiento activo. Según Younger (2002), implica la intervención de energía artificial externa o el uso de reactivos químicos para mejorar la calidad del agua sometida a tratamiento. Este proceso implica la aplicación de energía artificial de diversas formas, como energía calorífica, energía eléctrica, y presión, entre otras. Los reactivos químicos, por otro lado, son compuestos que generan alcalinidad con el propósito de elevar el pH, acelerar la velocidad de oxidación química mediante la aireación activa o la adición de un agente oxidante químico. Esto provoca que muchos de los metales presentes en solución precipiten en forma de hidróxidos y carbonatos (Álvarez, 2005). En la **Tabla 2** se presentan los reactivos químicos de tratamientos activos.

Tabla 2

Reactivos químicos utilizados en el tratamiento activo de aguas residuales

Reactivo Químico
Piedra caliza
Cal viva
Cal hidratada
Soda caustica
Soda ash
Amoniaco

Nota: Álvarez (2005).

2.2.5.2. Tratamiento pasivo. En la última década se han realizado distintos estudios sobre tratamientos pasivos ya que son amigables con el ambiente y no requieren insumos químicos continuos, con relación al tratamiento químico, este tipo de tratamientos requieren espacios amplios y tiempos de retención considerables. Pese a ello, los costos son inferiores al tratamiento activo, por lo que sus avances y perfeccionamientos son de gran interés. En la **Tabla 3** se presenta las tecnologías pasivas más utilizadas para el tratamiento de estas aguas.

Tabla 3

Tecnologías pasivas para el tratamiento de aguas residuales

Tratamiento Pasivos

Canales abiertos de piedra caliza
 Estanques de piedra caliza
 Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad
 Drenajes de piedra caliza anóxicos
 Humedales anaeróbicos
 Humedales aeróbicos
 Humedales artificiales o construidos

Nota: Álvarez (2005).

2.1.6. Humedales artificiales

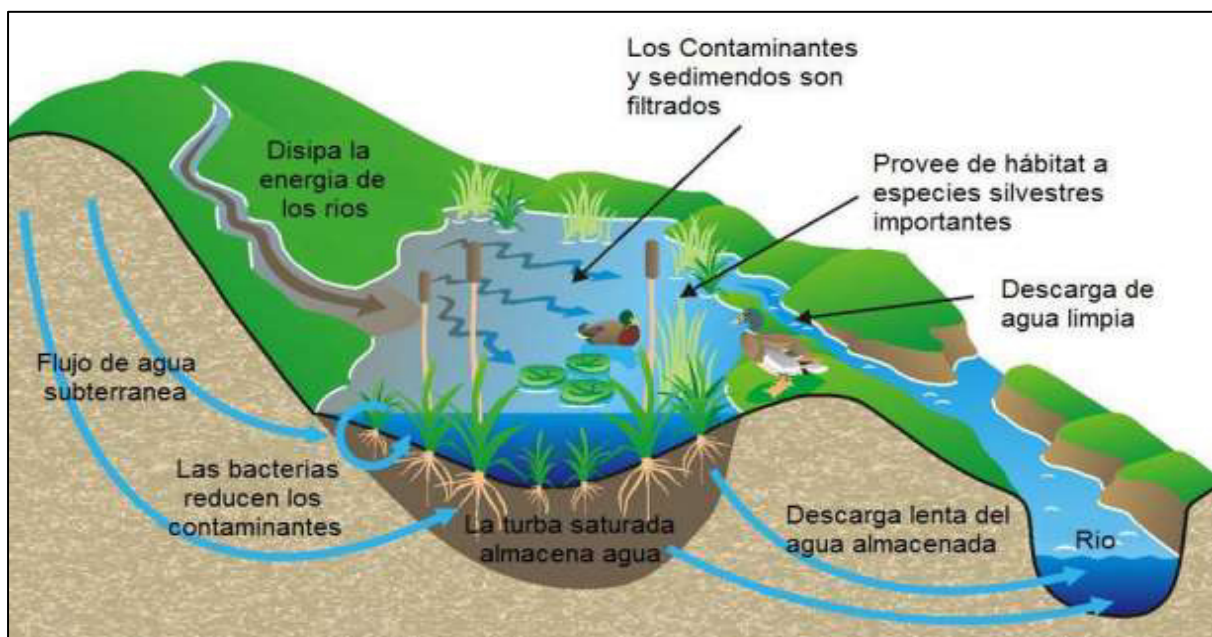
Los humedales fueron definidos por el Manual de la convención de Ramsar (2013) de la siguiente manera:

“Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, así como las áreas cubiertas de agua, ya sea de manera natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o en movimiento, y que pueden ser dulces, salobres o saladas, están comprendidas en esta definición. Esto incluye extensiones de agua marina con una profundidad en marea baja que no excede los seis metros”.

Como se observa en la **Figura 1**, los humedales son ecosistemas naturales, que también pueden ser artificiales, que tienen la capacidad de remover los contaminantes a nivel físico, químico y biológico.

Figura 1

Funcionamiento de un humedal



Nota: El gráfico fue extraído de Muñoz (2009).

Los humedales, definidos como extensiones de suelo con presencia de agua, ofrecen condiciones propicias para el desarrollo de vegetación y desempeñan un papel crucial en la erradicación de elementos contaminantes, tales como sedimentos y metales pesados, que se encuentran presentes en el agua, actuando efectivamente como biofiltros.

Según Lara (2000) citado por Muñoz (2009), los humedales se caracterizan por tener tres funciones básicas relacionadas al tratamiento de aguas:

- Aseguran físicamente los elementos contaminantes en la superficie del suelo.
- Emplean y alteran la materia orgánica mediante de los microorganismos.
- Logran niveles de tratamiento que alcanzan a ser considerados aceptables con un consumo de energía reducido y bajo mantenimiento.

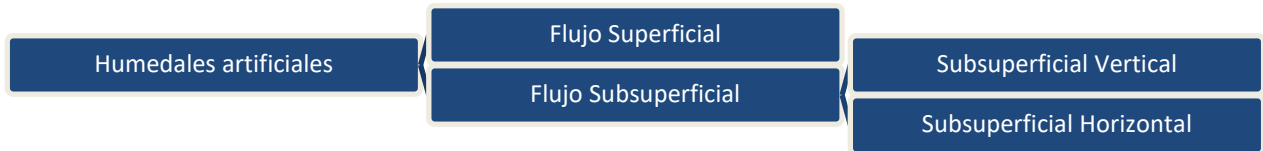
La distinción clave entre los humedales artificiales y otros procedimientos que tienden a ser empleados en la temática del tratamiento de agua radica en que los primeros dependen en gran medida de componentes naturales para el proceso de tratamiento y rara vez requieren equipos adicionales. Esto se traduce en costos operativos y de mantenimiento considerablemente bajos, lo que los hace ecoeficientes al consumir menos energía en comparación con otros sistemas de tratamiento de agua. Por su parte, los humedales de origen artificial tienen como característica principal el acondicionar el ambiente para que sea similar a un humedal natural; además, en este la degradación de la materia orgánica se desarrolla naturalmente a través de componentes que sean de origen químico, físico y biológico durante el proceso de descontaminación del agua.

2.1.7. Cualidades de los humedales artificiales

De acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (2020), los humedales construidos, que para efecto de esta investigación se mencionará como humedales artificiales, son clasificados de dos formas, según el flujo del agua (Figura 3) y el uso de las plantas macrófitas (Figura 3).

Figura 2

Clasificación de humedales artificiales por el tipo de flujo

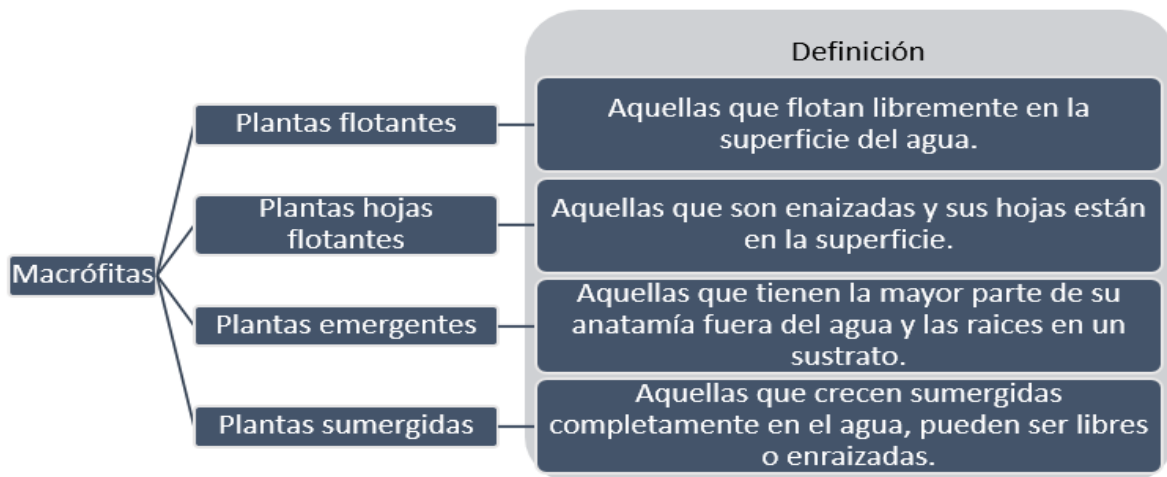


Nota: El gráfico fue extraído y adaptado de Vymazal (2008).

También hay sistemas híbridos, los cuales funcionan con ambas modalidades, flujo horizontal y flujo vertical.

Figura 3

Clasificación de humedales artificiales por el uso de las plantas macrófitas

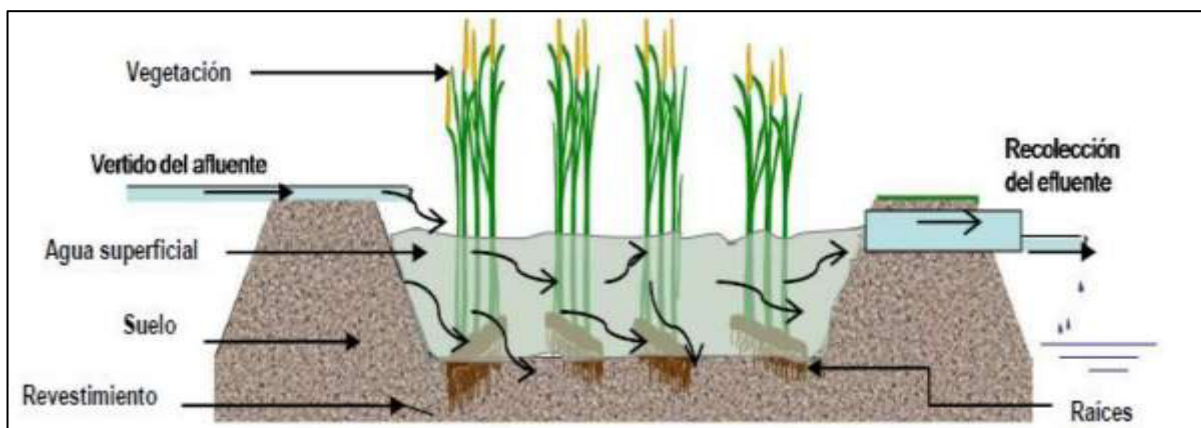


Nota: El gráfico fue extraído y adaptado de Vymazal (2008).

2.1.7.1. Humedales artificiales de flujo superficial. Según lo señalado por Rabat (2016), en los humedales de flujo superficial, el movimiento del agua ocurre sobre la superficie del sustrato desde el punto de entrada hasta el punto de salida del flujo, mientras que la vegetación se desarrolla en condiciones de inundación parcial o total, tal como se ilustra en la Figura 4. Este tipo de humedal para tratamiento guarda similitudes con los humedales naturales, presentando profundidades de agua que no superan los 60 cm, generalmente situándose en un rango de 30 a 50 cm.

Figura 4

Humedales artificiales de Flujo Superficial



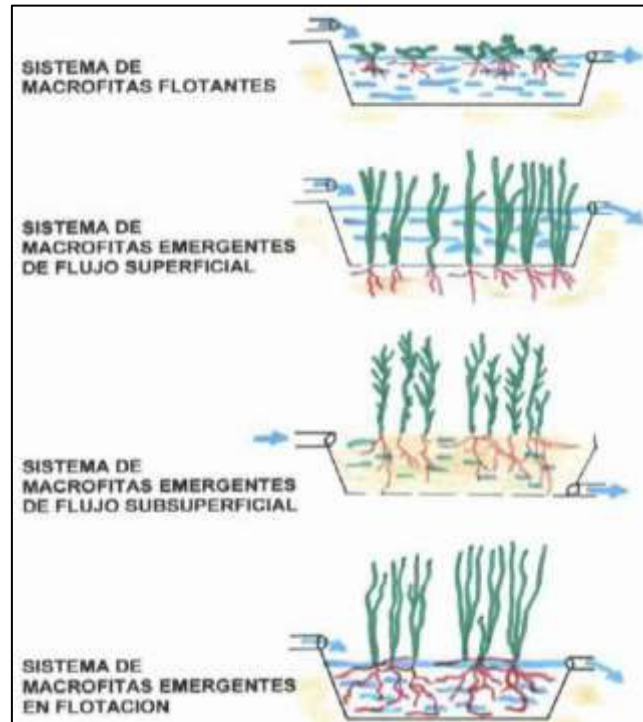
Nota: El gráfico fue extraído y adaptado de García y Corzo (2008).

Generalmente, en los humedales artificiales superficiales más de 50% de su superficie está cubierta por plantas emergentes. Estos sistemas son recomendados para el pulimiento final de efluentes, con poca concentración de materia orgánica (Muñoz, 2009)

Además, según Delgadillo et al. (2010), los humedales artificiales superficiales pueden clasificarse según el tipo de especies de vegetación macrófita empleadas. Esto se debe a que las macrófitas tienen dos funciones principales de acuerdo a estos autores: llevar a cabo la erradicación de nutrientes por medio de estas mismas y estructurarse como soporte para otras comunidades microbianas.

Figura 5

Sistemas de humedales artificiales superficiales con macrófitas



Nota: Esta imagen fue recuperada de Delgadillo, Pérez, Camacho, & Andrade (2010).

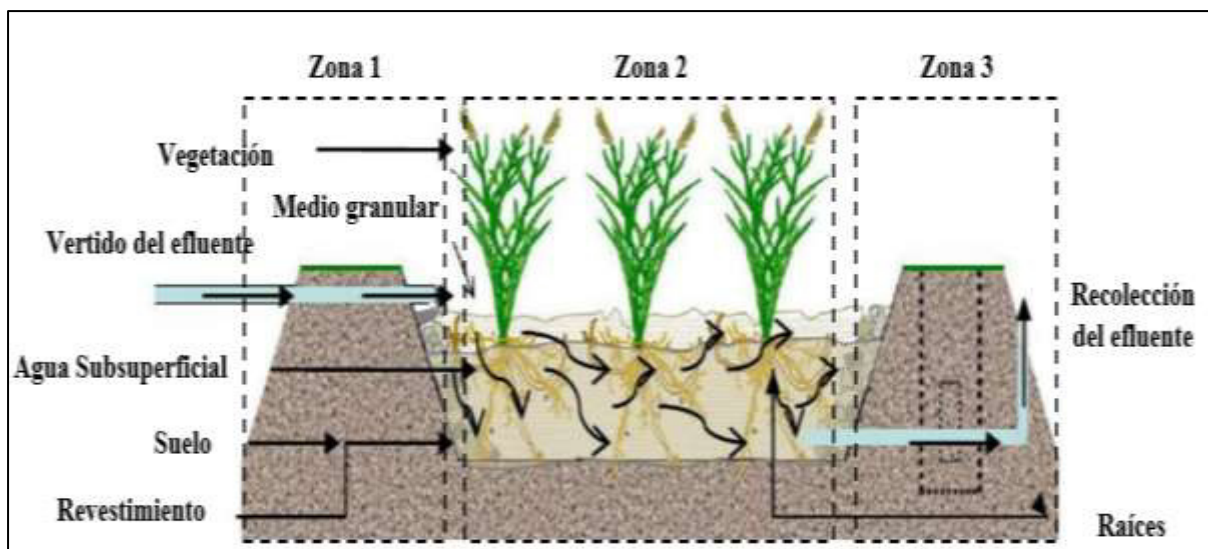
2.2.7.2. Humedales artificiales de flujo Subsuperficial. Un humedal artificial de flujo subsuperficial se caracteriza por tener un sistema donde el agua fluye a través de un medio poroso, ya sea el sustrato mismo o grava, con el objetivo de mantener constantemente el nivel del agua por debajo de la superficie del sustrato (Rabat, 2016). Según Muñoz (2009), este tipo de ecosistema acuático contribuye a prevenir inconvenientes como el desarrollo de olores desagradables o la proliferación de mosquitos. Comúnmente, estos sistemas se establecen sellando o impermeabilizando un contenedor, que luego se llena con un medio poroso compuesto de gravilla, arena y/o otros materiales apropiados para el crecimiento de la vegetación elegida, típicamente macrófitas emergentes. La profundidad de este medio poroso generalmente varía de 30 a 90 centímetros. (García y Corzo, 2008).

2.1.7.3. Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. Según lo descrito por Sánchez (2013), se estructuran en torno a una cavidad usualmente aislada para minimizar la interacción con el agua subterránea. Dentro de esta cavidad, se coloca un lecho de material granular (Figura 6), que se organiza en tres áreas distintas:

- Zona 1: Esta es el área de ingreso y regulación del flujo, diseñada para asegurar una distribución uniforme del agua a través del ancho del lecho.
- Zona 2: Constituye el núcleo principal del lecho, donde se promueve el crecimiento de la vegetación y ocurren la mayoría de los procesos de transformación del agua y sus componentes.
- Zona 3: Corresponde al área de egreso del agua, equipada con un conducto de drenaje que recoge el agua tratada y la dirige hacia un sistema de salida.

Figura 6

Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal



Nota: El gráfico fue extraído y adaptado de García y Corzo (2008).

El agua es introducida mediante un dispositivo que asegura su dispersión a lo largo de todo el lecho. Posteriormente, se desplaza de manera lenta por debajo de la superficie,

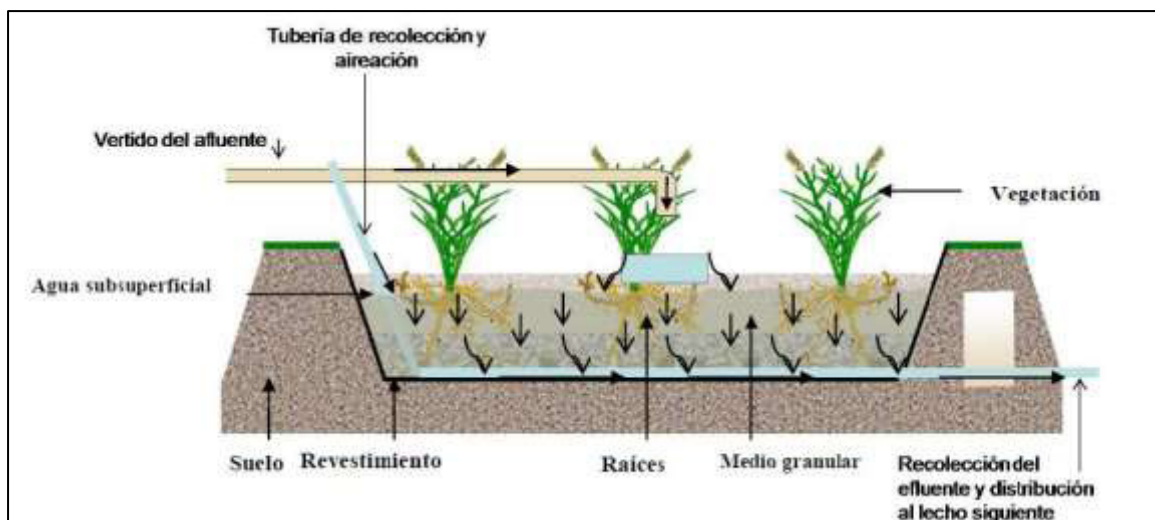
atravesando el medio poroso, hasta que finalmente llega al mecanismo de salida, donde es recopilada y evacuada.

2.1.7.4. Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. Rabat (2016) describe que este tipo de humedales reciben a las aguas residuales en la parte superior del medio poroso, desde donde se filtran hacia abajo, moviéndose a través del sustrato hasta que finalmente se recolectan en la base del lecho mediante un sistema de drenaje.

Asimismo, García y Corzo (2008) Se señala que el agua se introduce de manera intermitente en el sistema, razón por la cual se le denomina comúnmente como “filtro intermitente”. Esto permite que en el medio poroso se alternen períodos de saturación con momentos de aireación, en los cuales no hay flujo de agua. Esta alternancia facilita la oxigenación del sustrato entre las sucesivas adiciones de agua, promoviendo así el desarrollo de procesos aeróbicos, como se ilustra en la Figura 7.

Figura 7

Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical



Nota: El gráfico fue extraído y adaptado de García y Corzo (2008).

2.1.8 Componentes de los Humedales Artificiales

2.1.8.1. Agua. Las aguas residuales provienen de descargas generadas por una población específica, utilizadas en una variedad de actividades que incluyen las domésticas, comunitarias, industriales y agrícolas. Además, estas pueden originarse de fuentes subterráneas, superficiales y de precipitaciones.(Insignares, 2013).

2.1.8.2. Sustrato. El lecho filtrante, conocido como sustrato, puede estar compuesto por una variedad de materiales como arena, limo, grava seleccionada, arcilla o tezontle. La selección de estos materiales depende del tipo de agua que se va a tratar. El tamaño granular del sustrato juega un papel crucial en la eficacia de la absorción de contaminantes, aunque puede tener el efecto secundario de reducir el flujo hidráulico. (Insignares, 2013).

2.1.8.3. Vegetación. Las plantas desempeñan un papel esencial en los sistemas de tratamiento mediante humedales artificiales, gracias a sus capacidades para eliminar contaminantes y su contribución a la estabilización de la superficie del lecho filtrante. Este último es crucial para el proceso de filtración y para el desarrollo de microorganismos adheridos. Al seleccionar las especies vegetales para su uso en el tratamiento, es prioritario optar por especies nativas de la región, aquellas con una alta capacidad de erradicación de contaminantes, y especies que requieran un mantenimiento mínimo para ayudar a reducir los costos asociados. (Insignares, 2013).

2.1.8.4. Microorganismos. Los microorganismos juegan un papel fundamental en el tratamiento biológico dentro de los humedales artificiales, formando colonias tanto aerobias como anaerobias. Los organismos aerobios se ubican principalmente en la superficie del humedal, mientras que los anaerobios predominan en las profundidades del lecho filtrante. Estos microorganismos tienen la capacidad de convertir materia orgánica e inorgánica en compuestos inocuos e insolubles. Entre los microorganismos típicamente encontrados se

incluyen bacterias, virus, levaduras, hongos y protozoarios, cada uno contribuyendo de manera significativa al proceso de purificación del agua. (Insignares, 2013).

2.1.9. Procesos de tratamiento de los humedales artificiales

Los humedales artificiales emplean múltiples estrategias de depuración para tratar el agua, replicando los procesos naturales de los humedales, pero en un entorno controlado para aumentar la eficacia en la eliminación de contaminantes.

Subsiguientemente, en la Tabla 4, se detallarán los procesos que realizan dentro del humedal artificial para cada parámetro.

Tabla 4

Proceso de la remoción de los contaminantes en humedales artificiales

Contaminante	Proceso
Materia orgánica (MO), en función de DBO ₅ o DQO.	<ul style="list-style-type: none"> - Las partículas de materia orgánica son eliminadas por sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO₅ soluble. - La materia orgánica soluble es fijada y adsorbida por la biopelícula para posteriormente ser degradada por las bacterias adosadas al mismo.
Sólidos suspendidos totales (SST)	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentación y filtración. - Descomposición durante periodos largos de retención mediante bacterias especializadas en el estrato de arena.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrificación / Desnitrificación por la biopelícula. - Absorción de las plantas (influencia limitada).
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Retención en el estrato de arena (adsorción). - Precipitación con apoyo del aluminio, calcio y hierro. - Absorción de las plantas (influencia limitada).
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentación y filtración. - Adsorción por la biopelícula. - Depredación por protozoarios. - Eliminación de las bacterias por condiciones ambientales desfavorables (pH y temperatura).
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación y adsorción. - Absorción de las plantas.
Contaminantes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorción por la biopelícula y partículas de arena.

-
- Descomposición a causa de los largos periodos de retención y a las baterías especializadas (no calculable).
-

Nota: Hoffmann & Platzer (2011).

2.1.10. Aplicaciones de los humedales artificiales

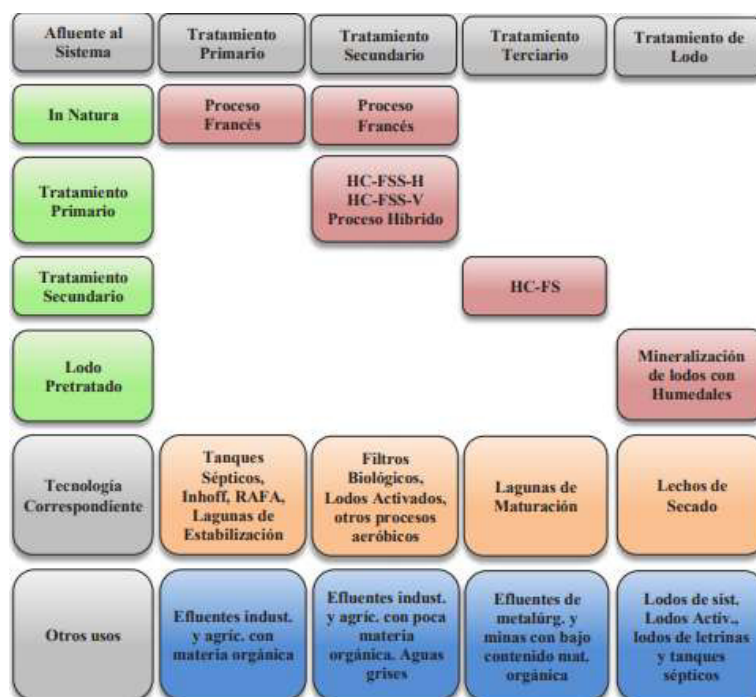
El tipo de humedales que se ha ido comentando en párrafos anteriores representan una solución versátil y ecológica para el tratamiento de aguas residuales, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones que abarcan desde el tratamiento secundario y terciario de aguas residuales hasta el manejo de lixiviados de rellenos sanitarios y efluentes de diversas industrias, incluyendo la agricultura y la refinación de petróleo. Su capacidad para restaurar ríos y lagos contaminados también destaca su papel crucial en la mejora de ecosistemas acuáticos deteriorados.

Estos sistemas no solo se limitan al tratamiento de aguas residuales convencionales, sino que también se aplican al tratamiento directo de estas mediante el uso del "Sistema Francés", ofreciendo una metodología definida para abordar diferentes tipos de aguas residuales in natura. Además, su adaptabilidad ha permitido la reciente inclusión del tratamiento de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales y potables, demostrando la innovación continua en su aplicación (Hoffmann y Platzer, 2011).

La eficacia estos radica en la erradicación de contaminantes se evidencia a través de su integración en diferentes etapas del tratamiento de aguas, con efectividad específica según la etapa aplicada, lo cual se detalla en la comparativa de la Figura 8 y tablas de eficacia.

Figura 8

Utilización de los humedales artificiales en distintas etapas del tratamiento de aguas residuales



Nota: Imagen extraída del manual del Banco Interamericano de Desarrollo (2020).

Tabla 5

Eficiencia de los humedales artificiales de acuerdo con la etapa de tratamiento

	Etapa del tratamiento			
	Primario + secundario	Secundario	Secundario	Terciario
Humedal artificial	Sistema francés	FSS-H	FSS-V	FS
DBO ₅	> 90 %	> 80 %	> 90 %	> 80 %
Sólidos suspendidos	> 90 %	> 80 %	> 90 %	> 80 %
Nitrógeno total	< 20 %	30 – 50 %	< 20 %	30 – 50 %
Fósforo total	10 – 20 %	10 – 20 %	10 – 20 %	10 – 20 %
Coliformes	1 a 3 log ₁₀	2 log ₁₀	2 a 4 log ₁₀	1 log ₁₀

Nota: Banco Interamericano de Desarrollo (2020).

Este enfoque multidimensional subraya la importancia de los humedales artificiales en el panorama de tecnologías de tratamiento de aguas, proporcionando no solo un método de depuración efectivo sino también contribuyendo a la conservación del medio ambiente y la biodiversidad.

2.1.11. Efectos Ecotoxicológicos

Los humedales artificiales, diseñados para el tratamiento de aguas residuales y la mejora de la calidad del agua, generalmente tienen un impacto positivo en el medio ambiente al reducir la contaminación y promover la biodiversidad. Sin embargo, como cualquier intervención humana en ecosistemas naturales, pueden tener efectos ecotoxicológicos, dependiendo de su diseño, ubicación, y gestión. Según Chacón et al. (2013); existen ensayos toxicológicos que se utilizan como herramientas de diagnóstico, los cuales sirven para evaluar el potencial inherente de las sustancias fisiológicamente capaz de producir una acción desfavorable en un organismo.

Subsiguientemente, se detallan algunos posibles efectos ecotoxicológicos asociados con los humedales artificiales:

1. Acumulación de Contaminantes en el Sustrato

Los humedales artificiales pueden acumular metales pesados y otros contaminantes persistentes en su sustrato. Aunque esto ayuda a eliminar los contaminantes del agua, puede convertirse en una fuente de toxicidad a largo plazo si no se gestiona adecuadamente.

2. Impacto en la Fauna Local

Aunque los humedales artificiales pueden crear hábitats para muchas especies, la introducción de especies no nativas o el cambio en la calidad del agua puede afectar negativamente a las especies locales. Es importante seleccionar cuidadosamente las plantas y animales que se introducen en estos sistemas.

3. Liberación de Compuestos Nocivos

Bajo ciertas condiciones, los humedales artificiales pueden liberar amoníaco, metano, y otros compuestos que contribuyen al cambio climático o que son tóxicos para la fauna acuática y terrestre circundante.

4. Eutrofización

Si no se controla adecuadamente, los nutrientes acumulados en el humedal, como nitratos y fosfatos, pueden ser liberados en cuerpos de agua cercanos, promoviendo la eutrofización y el crecimiento excesivo de algas, lo que reduce los niveles de oxígeno y puede matar la vida acuática.

5. Alteración de Flujos Hidrológicos

La construcción de humedales artificiales puede alterar los flujos de agua superficiales y subterráneas, potencialmente afectando los ecosistemas acuáticos y terrestres adyacentes.

6. Uso de Químicos

En algunos casos, el mantenimiento de los humedales artificiales puede requerir el uso de químicos para controlar especies invasoras o enfermedades, lo que podría tener efectos nocivos sobre la fauna beneficiosa y la calidad del agua.

Para minimizar estos efectos ecotoxicológicos, es crucial realizar una planificación cuidadosa, incluyendo estudios de impacto ambiental, y adoptar prácticas de gestión sostenible. Esto implica el monitoreo regular de la calidad del agua y del sustrato, la gestión cuidadosa de la vegetación y la fauna, y la implementación de estrategias para mitigar la acumulación de contaminantes. (Castillo, 2004).

2.2. Marco Conceptual

- ❖ ***Agua Residual:*** Estos líquidos cuya pureza se deteriora por la influencia de las actividades humanas, modificando la constitución original del agua a través del aporte de sustancias contaminantes de naturaleza física, química y biológica.
- ❖ ***Tratamiento de Aguas Residuales:*** Cualquier proceso, ya sea físico, químico o biológico, destinado a minimizar la presencia de contaminantes contenidos en el agua, con el objetivo de atenuar el impacto ambiental en los efluentes que cumplen la función de recepcionan estas aguas, así como reducir la propagación de enfermedades y prevenir el daño a la vegetación en áreas cercanas al desagüe.
- ❖ ***Ph:*** El pH es un indicador físico que varía en función de la presencia de gases disueltos, ácidos orgánicos, compuestos húmicos y sales minerales, determinando así el grado de acidez o alcalinidad del agua. Este parámetro oscila entre valores que indican acidez, de 6 a 0, siendo 7 el punto neutro, y valores hasta 14, que señalan una condición totalmente básica o alcalina.
- ❖ ***Humedales Artificiales:*** Se trata de infraestructuras diseñadas ingenierilmente que utilizan elementos naturales para purificar el agua de residuos. Están compuestas por una superficie cubierta con un material que impide la filtración del líquido hacia el subsuelo, asegurando así que el tratamiento se realice de manera controlada y efectiva.

2.3. Marco Legal

Actualmente en el Perú no hay normativa específica para humedales artificiales, sin embargo, se tendrá en cuenta que la calidad del efluente vertido será recepcionado por un cuerpo receptor o utilizado para un proceso específico.

2.3.1. *Ley n.º 28611.- Ley General del Ambiente*

El propósito es garantizar que todos los individuos y seres vivos tengan el derecho a habitar en un entorno saludable, justo y propicio para su desarrollo, promoviendo así el avance en la gestión ambiental, la protección general del medio ambiente y contribuyendo a su preservación.

2.3.1.1. Artículo 121º. - Del vertimiento de aguas residuales. En esta sección se señala las responsabilidades y obligaciones de toda aquella empresa/entidad que lleve a cabo actividades que en algún momento puedan generar aguas residuales, recalando como estas deben llevar a cabo el tratamiento de estas aguas con la finalidad de que puedan ser compatibles con lo establecido por la normativa ambiental.

2.3.1.2. Artículo 122º. - Del tratamiento de residuos líquidos. Se encarga de regular el uso de los recursos hídricos que involucra todos los cuerpos de agua para llevar a cabo una gestión integral con la contribución de los organismos privados, el Estado y los beneficiarios a ello.

122.3 “Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a

través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.”

2.3.2. Ley N° 29338.- Ley de Recursos Hídricos

“Se encarga de regular el uso de los recursos hídricos que involucra todos los cuerpos de agua para llevar a cabo una gestión integral con la contribución de los organismos privados, el Estado y los beneficiarios a ello”.

2.3.2.1. Artículo 79°. - Vertimiento de agua residual. Similar a lo comentado en artículos anteriores, en este se recalca el hecho de que la autoridad nacional es el único organismo que puede proveer las autorizaciones de vertimiento y que tiene a su vez la responsabilidad de verificar que las aguas que sean vertidas se encuentren en los niveles correspondientes, así como, en casos específicos, añadir procedimientos complementarios para el tratamiento de estas.

2.3.3. Reglamento de la Ley N° 29338.

Es la ley específica en relación a definición, usos, autoridades y restricciones de los recursos hídricos.

2.3.1.3. Artículo 131°. - **Aguas residuales y vertimientos.** Brinda las definiciones de dos términos. Por un lado, las aguas residuales que son efluentes cuyas cualidades han sido alteradas por actividades antropogénicas. Por otro lado, el vertimiento de aguas residuales es el acto de descargar aguas residuales que hayan sido sometidas a tratamientos previos.

2.2.3.2 Artículo 132°. - **Aguas residuales domésticas y municipales.** Brinda las definiciones de dos términos. Por un lado, las aguas residuales domésticas son efluentes que se caracterizan por contener desechos de origen fisiológicos, así como un origen de la actividad humana. Por otro lado, las aguas residuales municipales son efluentes de origen industrial que logran obtener los requisitos para ser incluidas en los sistemas de alcantarillado.

2.3.4. Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda

Esta resolución establece las directrices destinadas a fomentar procedimientos tales como el tratamiento y reutilización de las aguas residuales para que estas puedan ser empleadas en el riego de las áreas verdes de las urbes.

2.3.5. Norma OS-090: Planta de Tratamiento de Agua Residual

La Norma OS-090 está orientada a establecer regulaciones para la creación de proyectos de tratamiento de aguas residuales municipales en etapas preliminares, básicas y definitivas, con el propósito de que estas puedan ser adecuadamente tratadas antes de su descarga en cuerpos acuáticos o su reutilización.

2.3.6. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Aquí se definen los LMP para los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales; es decir, hasta que nivel y/o concentración se permiten la aparición de parámetros determinados para que no sean capaces de causar daño al medio ambiente o a la salud pública.

Tabla 6*Límite Máximo Permisible para efluentes de PTAR*

Parámetros	Unidad	LMP
Aceites y grasas	mg/l	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ML	10000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	200
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/l	150
Temperatura	°C	< 35

Nota: Ministerio del Ambiente (2010).**2.3.7. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.**

Aprueba los ECA para Agua y establecen disposiciones complementarias, así como las categorías en las cuales se dividen los primeros.

Tabla 7*Límite Máximo Permisible para efluentes de PTAR*

Parámetros	Unidad	LMP
Aceites y grasas	mg/l	5
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ML	1000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	40
pH	Unidad	6.5 – 8.5
Temperatura	°C	Δ 3

Nota: Ministerio del Ambiente (2017).

III.MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

El diseño de la investigación, según el grado de uso de variable, es **experimental** ya que la muestra será analizada, previa intervención y manipulación, para verificar la eficiencia de ambos biofiltros. Asimismo, se considera que según el nivel de medición es de tipo **cuantitativo**, ya que las variables serán medidas antes y después del tratamiento. El nivel de investigación es **descriptivo**, dado que el objetivo es detallar las propiedades y cualidades relevantes de los fenómenos bajo estudio. (Hernández et al., 2014)

3.2 Ámbito Temporal y Espacial

3.2.1. *Ámbito Temporal*

Al ser un estudio aplicado de diseño experimental, este contempla un periodo específico para su ejecución, que abarca desde la recopilación inicial de datos hasta la elaboración del informe final. Este proceso comienza con una fase de búsqueda bibliográfica exhaustiva. Posteriormente, la etapa experimental o la realización de pruebas se establecieron para llevarse a cabo entre octubre y diciembre de 2021, finalizando con la preparación y entrega del informe final en diciembre de 2023.

3.2.2. *Ámbito Espacial*

Esta investigación se llevará a cabo en un entorno de laboratorio controlado, eliminando la necesidad de realizar trabajo de campo. Esto se debe a que las cualidades y el enfoque del estudio se alinean con una investigación pura. Por ende, el escenario específico para la fase experimental será el laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la UNFV. En este espacio, las muestras se prepararán y adaptarán para su análisis en un Sistema de Humedales Artificiales configurado en el laboratorio previamente mencionado y siendo sometido constantemente a un cuidado por parte

del investigador. Este sistema se utiliza para el tratamiento de aguas residuales, cuyos resultados servirán como fundamento para la realización de todas las pruebas y análisis experimentales posteriores. La ubicación exacta de este estudio se sitúa en el laboratorio previamente mencionado, con coordenadas geográficas UTM: 277097 E y 8 667 468 N.

3.3 Variables

3.3.1. *Variable Independiente*

Humedales Artificiales subsuperficiales.

3.3.2. *Variable Dependiente*

Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

En la tabla 8 y tabla 9, se pueden observar la variable independiente y dependiente, respectivamente.

Tabla 8

Variable independiente

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	
Humedales artificiales subsuperficiales	Sustrato	Tipo de sustrato	-	
	Vegetación	Tipo de vegetación	-	
	Dimensiones del humedal	Caudal		H3/día
		Área Superficial		H2
		Ancho		m
		Alto		m
	Tiempo de retención hidráulico		día	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 9*Variable dependiente*

Variable	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
Tratamiento de aguas residuales domésticas	Parámetros fisicoquímicos	Temperatura	°C
		Potencial de Hidrógeno	Ph
		Conductividad Eléctrica	µs/cm
		TDS	mg/L
		Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L
		Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L
		Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L
		Amonio (NH4 +)	mg/L
		Fosfato (PO4 -3)	mg/L
		Aceites y grasas	mg/L
	Parámetros microbiológicos	Coliformes totales	NMP/100 ml
		Coliformes fecales	NMP/100 ml

Nota: Elaboración propia.

3.4 Población y Muestra

3.4.1. Población

Para nuestro estudio, se decidió utilizar el agua residual proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Maria Raiche, ubicada en el distrito de Miraflores. La recolección de las muestras se efectuó tras completarse el proceso de tratamiento primario de las aguas residuales.

3.4.2. Muestra

Las muestras se transportaron bajo condiciones ambientales reguladas hasta el laboratorio mencionado con anterioridad. De manera semanal, se recolectó agua residual de la planta para suministrar al sistema de humedales artificiales.

3.5 Instrumentos

3.5.1. Técnica

- **Observación**

La observación constituye una técnica fundamental en la investigación, permitiendo el registro directo de fenómenos tal como se presentan en su contexto natural. Esta técnica es especialmente valiosa por su capacidad para proporcionar datos cualitativos y cuantitativos sobre comportamientos, procesos y eventos en tiempo real.

3.5.2. Instrumentos utilizados en la investigación

- **Protocolo de Monitoreo para Aguas Residuales:** Este documento establece las directrices y procedimientos para el seguimiento y análisis del agua residual, asegurando la consistencia y precisión de los datos recolectados.
- **Protocolo de Seguridad para Laboratorios de Ensayo UNFV:** Un conjunto de normas y medidas de seguridad diseñadas para proteger al personal y prevenir accidentes dentro del laboratorio durante la realización de pruebas.
- **Manual sobre Métodos Estandarizados para Análisis de Agua Natural y Residual:** Guía detallada que describe los procedimientos normalizados para el análisis de muestras de agua, garantizando la fiabilidad y comparabilidad de los resultados.
- **Cadena de Custodia para la Toma de Muestras:** Procedimiento documentado que asegura la trazabilidad y la integridad de las muestras desde su recolección hasta su análisis en el laboratorio.
- **Fichas de Recolección de Datos:** Herramientas estandarizadas utilizadas para registrar de manera sistemática las observaciones, mediciones y resultados obtenidos durante el estudio.

Estos instrumentos son esenciales para garantizar la calidad y la seguridad del proceso

de investigación, permitiendo obtener resultados confiables y reproducibles.

3.5.3. Equipos y Materiales

3.5.3.1. Materiales. Para la estructuración de los humedales artificiales de flujo subsuperficial que serían empleados en el estudio se decidió hacer uso de herramientas específicas tanto para la estructura del sistema como para el sustrato, asegurando un ambiente óptimo para el tratamiento de aguas residuales. Aquí se detalla su uso y propósito:

- **Sustratos:**
 - Arena fina y arena gruesa: Utilizadas para crear capas de filtración que retienen partículas suspendidas y facilitan el crecimiento de microorganismos beneficiosos.
 - Piedra chancada: Proporciona una base sólida y drenaje eficaz dentro del humedal, permitiendo el flujo controlado del agua a través del sistema.
 - Tierra de chacra: Enriquece el sustrato con nutrientes esenciales, apoyando el crecimiento de las plantas acuáticas utilizadas en el humedal.
- **Sistema humedal:**
 - Vidrio de 6mm: Sirve como barrera física o estructura de contención para el humedal, asegurando que el agua se mantenga dentro del sistema y fluya a través de los sustratos designados.
 - Bushing de PVC de 1" x ¾" y unión de PVC con reducción de ¾ a ½": Componentes claves para la conexión y el ajuste adecuado de la tubería del sistema, garantizando un flujo eficiente y sin fugas.
 - Llave de paso de plástico de ¾": Permite controlar el flujo de agua dentro del sistema, facilitando el mantenimiento y la operación del humedal.

- Manguera transparente, conectores y tubos de PVC: Se utilizan para dirigir el agua a través del humedal, desde la entrada hasta la salida, asegurando una distribución uniforme y eficaz del agua a tratar.

Estos materiales, seleccionados cuidadosamente, juegan un papel crucial en el diseño y funcionamiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, permitiendo un tratamiento eficiente de las aguas residuales mediante procesos naturales y sostenibles.

3.5.3.2. Equipos. Para determinar los parámetros fisicoquímicos de las muestras en el estudio de humedales artificiales, se requiere el uso de equipos específicos diseñados para analizar y medir una amplia gama de cualidades del agua. Estos equipos permiten evaluar la calidad del agua antes y después del tratamiento en los humedales, proporcionando datos esenciales para el análisis de la eficiencia del sistema. Entre los equipos utilizados se incluyen:

- Incubadora
- Reactor digital
- Colorímetro
- Balanza analítica
- Bomba de vacío
- Esterilizador al seco
- Balanza Analítica Electrónica, marca SARTORIUS
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica, marca THERMO SCIENTIFIC.
- Medidor de Conductividad Eléctrica, marca HANNA.
- Medidor Multiparámetro portátil, marca HANNA.

3.6 Procedimiento

3.6.1. Caracterización del agua residual a tratar

Para la caracterización del agua residual que será tratada, se empleará agua residual de la PTAR Maria Reiche en Miraflores. Esta agua se recogerá después del proceso de pretratamiento, el cual incluye pasos como rejas gruesas, rejas finas y un desarenador, para asegurar que el agua esté libre de partículas grandes y arena antes del análisis.

El análisis de la calidad del agua se centrará en una serie de parámetros físicos y químicos clave para establecer las concentraciones iniciales de los contaminantes. Parámetros como el pH, la temperatura, la conductividad y los sólidos totales disueltos (TDS) se medirán directamente en el sitio de extracción. Por otro lado, otros indicadores críticos para evaluar la contaminación del agua, incluyendo la DBO5, la DQO, los SST, el NH4+, el PO4-3, aceites y grasas, así como coliformes totales y fecales, se analizarán en laboratorio.

Para garantizar la precisión y la confiabilidad de los resultados, se seguirán las metodologías acreditadas por la APHA, la AWWA y la WPCF. Estas metodologías son estándares reconocidos internacionalmente para el análisis de calidad del agua, asegurando que los datos recopilados sean válidos para una evaluación exhaustiva de la contaminación presente en el agua residual y para determinar la eficacia del tratamiento en los humedales artificiales.

3.6.2. Procedimiento para diseño del humedal artificial.

El diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial se basa en criterios técnicos específicos y cálculos precisos para garantizar su eficacia en el tratamiento de aguas residuales. Subsiguientemente, se describe un procedimiento general basado en las directrices proporcionadas por la Environmental Protection Agency (EPA):

Determinación del Caudal (Q)

$$As = \frac{Q \ln \frac{C_0}{C_e}}{Kt(h)(n)}$$

Determinación del Área superficial

$$l = \frac{As}{a}$$

En la cual:

Ce: Referida a la concentración de DBO en el efluente (mg/L)

Co: Referida a la concentración de DBO en el afluente (mg/L)

Q: Referida al caudal de ingreso a los humedales (H3/d)

h: Correspondiente a la profundidad promedio del sistema.

a: Correspondiente al ancho del humedal (m)

l: Correspondiente a la longitud del humedal (m)

Kt: Referida a la constante de primer orden dependiente de la T° (d-1)

n: Referida a la porosidad promedio del sistema en fracción decimal

K20: Correspondiente a la constante de primer orden a 20°C (d-1)

T: Temperatura

Como se puede observar, se hizo uso de la información provista en la Tabla 10; **K20** y “**n**” (**porosidad**) presentada a continuación:

Tabla 10

Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial

Tipo de medio	Tamaño del grano (mm)	Porosidad (n)	K₂₀
Arena media	1	0.42	1.84
Arena gruesa	2	0.39	1.35
Gravilla arenosa	8	0.35	0.86

Nota: Espinosa Ortiz (2014)

Valores Kt y n para ecuaciones de la EPA:

$$Kt = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$$

Constante de primer orden dependiente de la T°

$$n = 0.35$$

La proporción idónea de largo y ancho del sistema del humedal es de 1:2, de ancho y largo respectivamente.

Por lo tanto, considerando la proporción ideal y la factibilidad del sitio para la construcción de humedales artificiales, se planificarán tres sistemas piloto con dimensiones de 0.8 metros de largo y 0.4 metros de ancho cada uno. Se procederá a medir la concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el agua afluente (C_o) en mg/L, proveniente de aguas residuales domésticas antes de ingresar al sistema de humedales, y también se determinará la concentración de DBO en el efluente (C_e) en mg/L, correspondiente al agua tratada que sale del sistema. Esta información crítica permitirá calcular la profundidad adecuada del humedal para optimizar el tratamiento.

Asimismo, se aplicarán las ecuaciones correspondientes para establecer el área superficial necesaria (A_s) y el caudal de ingreso (Q) de los humedales, así como para calcular la constante de descomposición a temperatura específica (Kt).

$$l = \frac{A_s}{a}$$

$$Kt = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$$

$$A_s = \frac{Q \ln \frac{C_o}{C_e}}{Kt(h)(n)}$$

Estas fórmulas son esenciales para dimensionar correctamente el sistema de humedales y asegurar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Estas operaciones matemáticas

permiten una precisión en el diseño que se ajusta a las necesidades específicas del proyecto, basándose en los parámetros y condiciones ambientales presentes

3.6.3. Construcción de los humedales artificiales

Los humedales artificiales serán construidos siguiendo los lineamientos específicos establecidos en el manual de la EPA, asegurando uniformidad en su diseño y funcionalidad. Estos sistemas se fabricarán con vidrio transparente de 6 mm de grosor y tendrán dimensiones de 0.8 metros de largo, 0.30 metros de altura y 0.40 metros de ancho. Cada humedal incluirá dos orificios en sus lados para facilitar el flujo de entrada y salida de agua mediante tuberías.

Para la gestión y distribución equitativa de las muestras que serán recepcionadas a los tres humedales artificiales, se empleará un contenedor con una capacidad de 50 litros. Esta disposición garantiza que cada sistema reciba una distribución homogénea del agua a tratar, optimizando el proceso de depuración en los humedales.

Figura 9

Conexiones para la salida del contenedor hacia los humedales



Figura 10

Conexiones para el ingreso de agua hacia los humedales

**Figura 11**

Instalación de las mangueras a través de abrazaderas metálicas e instalación del push de salida de agua residual

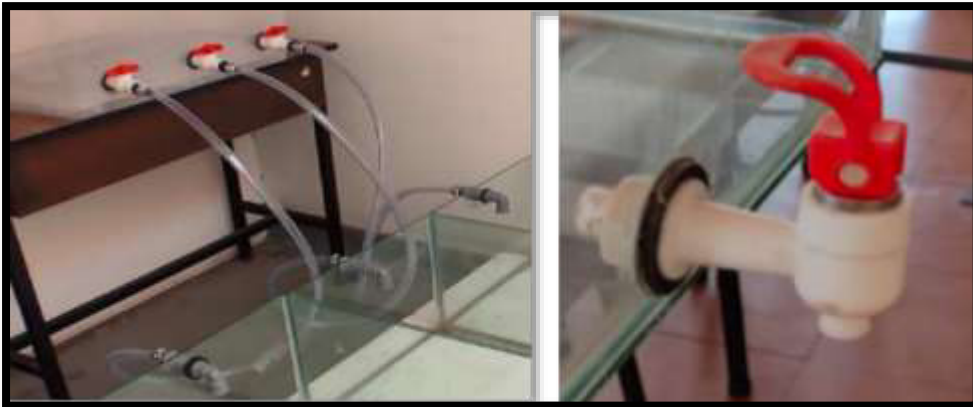


Figura 12

Sistema de humedales artificiales con 3 salidas



3.6.4. Implementación de sustratos y especies

Una vez elaborado el humedal se procedió a colocar los sustratos (piedra chancada, arena fina, arena gruesa y tierra de chacra) en los 3 humedales, cada uno tuvo una capa de 5 cm.

Figura 13

Implementación de la piedra chancada

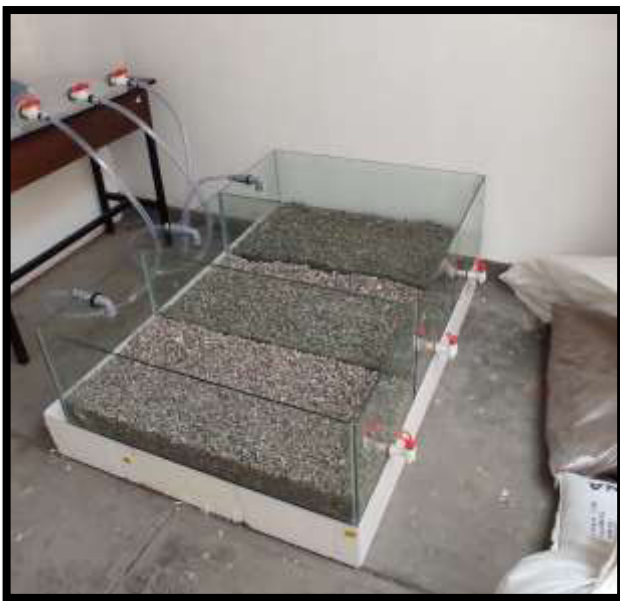
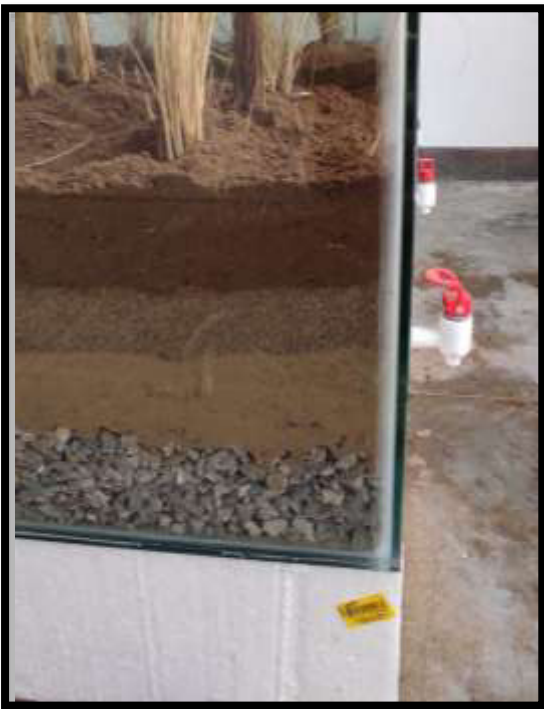


Figura 14

Implementación de la arena gruesa y fina

**Figura 15**

Vista frontal de los niveles de sustratos implementados en los humedales



A continuación, se procedió a sembrar dos especies de plantas cuya distribución fue distinta en cada uno de los tres humedales diseñados para el estudio. La distancia entre los ejemplares plantados en todos los casos fue de 10 cm para asegurar un crecimiento óptimo y facilitar la evaluación de sus efectos en el tratamiento de aguas residuales.

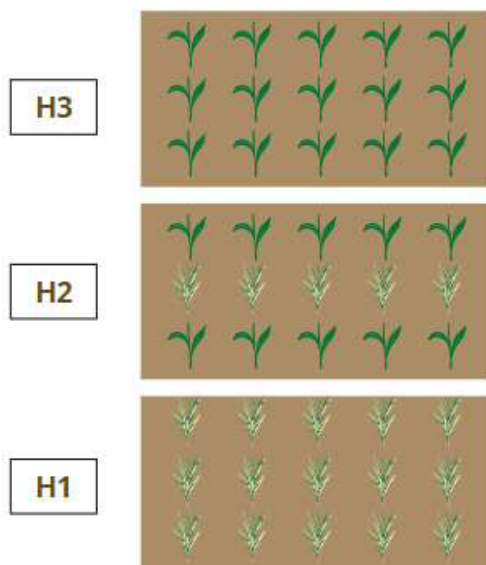
En el primer humedal (H1), se plantaron 15 ejemplares de *Stipa ichu*. Esta planta, nativa de regiones andinas, fue seleccionada por su capacidad de adaptación a condiciones extremas y su potencial para contribuir a la degradación de la materia orgánica.

En el segundo humedal (H2), se optó por una combinación de plantas para evaluar posibles sinergias en el tratamiento de aguas. Se plantaron 10 ejemplares de *Phragmites australis*, una planta comúnmente utilizada en sistemas de tratamiento de aguas residuales por su alta eficiencia en la absorción de nutrientes y contaminantes. Adicionalmente, se plantaron 5 ejemplares de *Stipa ichu* para comparar su desempeño combinado.

Por último, en el tercer humedal (H3), se plantaron 15 ejemplares de *Phragmites australis*. Esta configuración se eligió para evaluar la eficacia de esta especie cuando se utiliza de manera exclusiva en el tratamiento de aguas residuales.

Figura 16

Distribución de las especies en los diferentes humedales



IV. RESULTADOS

Los resultados se obtuvieron en base a 1 monitoreo llevados a cabo en octubre del 2021. Posteriormente se realizó el tratamiento del agua en un sistema de humedales artificiales. El primer monitoreo se realizó el 27 de octubre del 2021, con la caracterización del agua residual e inicio del tratamiento por 45 días, luego se realizó 7 monitoreos cada 5 días en los humedales artificiales instalados el cual conto con tres sistemas, donde se determinó los parámetros fisicoquímicos para cada uno.

4.1 Caracterización del Agua Residual

Subsiguientemente, se muestran los resultados de la caracterización del agua residual tomada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas María Reiche, el día 27 de octubre del 2021.

Tabla 11

Resultados iniciales de la caracterización del agua residual doméstica.

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1-H2	6.51	1.166	0.567	200	137	2.2	1290	625

(*) Monitoreado el 27 de octubre del 2021

4.2 Niveles de erradicación de los parámetros fisicoquímicos

En las tablas abajo indicadas, se muestran los resultados alcanzados por los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3, los cuales fueron monitoreados en tiempos de 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 45 días. Los parámetros fisicoquímicos considerados para evaluar la erradicación de la materia orgánica fueron 8 en total, esto en razón, de tener un mayor panorama con respecto al comportamiento de las variables en estudio, sin embargo, cabe indicar que los principales indicadores de la presencia de cargas orgánicas son principalmente (DBO, DQO, Turbiedad y SST).

Tabla 12

Resultados fisicoquímicos para 5 días de tratamiento.

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	5.35	24.56	15.24	136	31.7	58.6	1012	486
H2	5.26	23.59	11.79	129	27.5	46.2	999	479
H3	5.30	23.40	11.65	138	21.6	45.6	1113	512

(*) Monitoreado el 1 de noviembre del 2021.

Tabla 13

Resultados fisicoquímicos para 10 días de tratamiento

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	7.64	29.9	14.95	78	93.5	58.5	904	433
H2	7.82	24.3	12.16	72	25	47.5	884	432
H3	7.80	23.18	11.61	71	44	45.3	1007	491

(*) Monitoreado el 6 de noviembre del 2021.

Tabla 14*Resultados fisicoquímicos para 15 días de tratamiento.*

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	5,6	26.78	12.65	42.9	84.5	50.4	887	433
H2	5.8	21.43	10.74	31.3	19.5	41.7	679	329
H3	5.43	20.89	10.47	44.6	40	40.8	576	278

(*) Monitoreado el 11 de noviembre del 2021.

Tabla 15*Resultados fisicoquímicos para 20 días de tratamiento*

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	7.8	15.05	7.53	11.7	73	29.5	427	204
H2	7.56	12	5.97	17.5	18	23.4	107	49
H3	7.62	9.05	4.52	22.1	25	17.7	12	6

(*) Monitoreado el 16 de noviembre del 2021.

Tabla 16*Resultados fisicoquímicos para 25 días de tratamiento*

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	8	18.03	7.48	14.2	75	32.4	535	247
H2	7.83	17.64	6.03	16.6	18	27.5	126	58
H3	7.76	15.72	4.72	7.5	21	18.9	16	4

(*) Monitoreado el 21 de noviembre del 2021.

Tabla 17*Resultados fisicoquímicos para 30 días de tratamiento*

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	6.57	14.17	7.13	10.4	69.5	27.9	316	137
H2	6.69	11.46	5.7	14.2	15.5	22.4	95	41
H3	6.87	8.49	4.21	7.1	17.5	16.6	3	1

(*) Monitoreado el 26 de noviembre del 2021.

Tabla 18*Resultados fisicoquímicos para 45 días de tratamiento*

Muestra	PARAMETROS FISICOQUIMICOS (*)							
	pH	C.E (mS)	TDS (g/l)	TURBIEDA (NTU)	SST (mg/l)	Salinidad	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)
H1	6.49	14.17	7.08	10.1	56.5	26.8	30	12
H2	6.66	11.35	5.6	13.5	12	21.6	12	4
H3	6.85	8.24	4.15	6.92	10	16.3	0	0

(*) Monitoreado el 11 de diciembre del 2021.

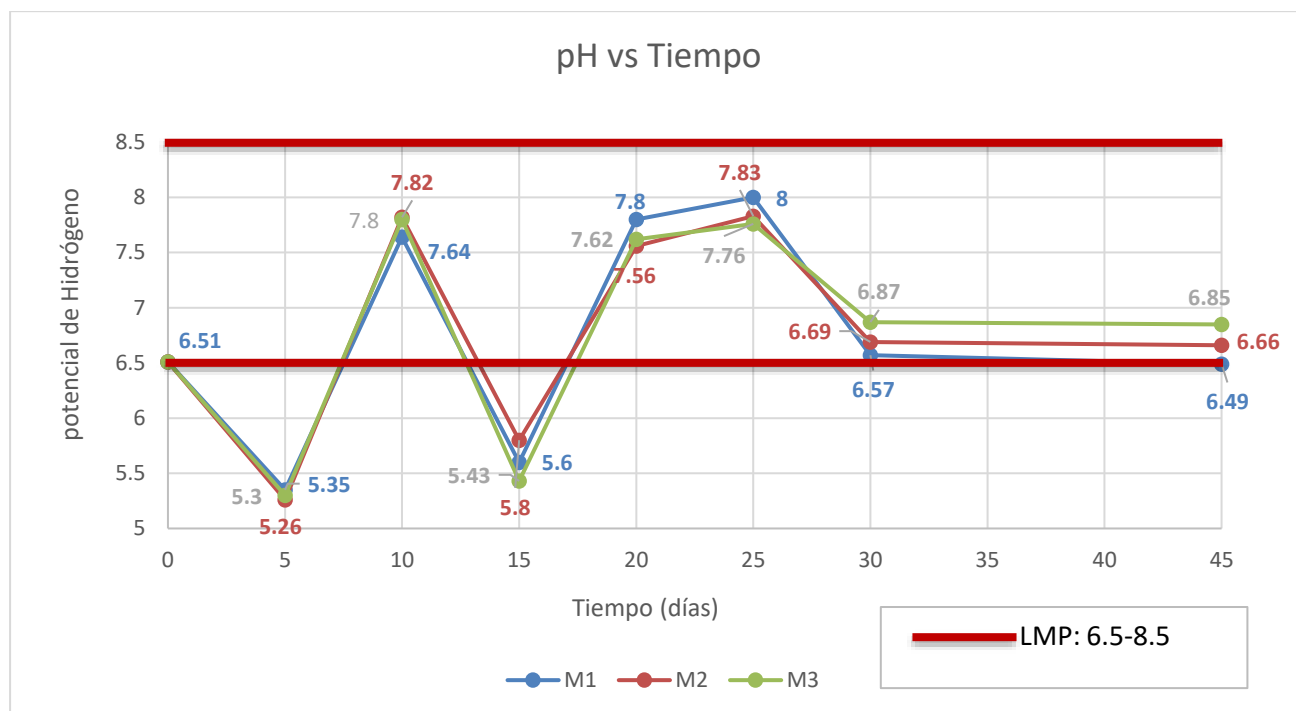
4.2.1 Indicadores Fisicoquímicos en el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

Subsiguientemente, se evalúan cada uno de los parámetros fisicoquímicos, con la finalidad de conocer el comportamiento y sus niveles de erradicación obtenidos por medio de los tres sistemas de tratamiento.

4.2.1.1. Potencial de Hidrógeno (pH). Subsiguientemente, en la Figura 17, permite observar el potencial de hidrógeno para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 17.

Resultados de pH para los tres sistemas de tratamiento

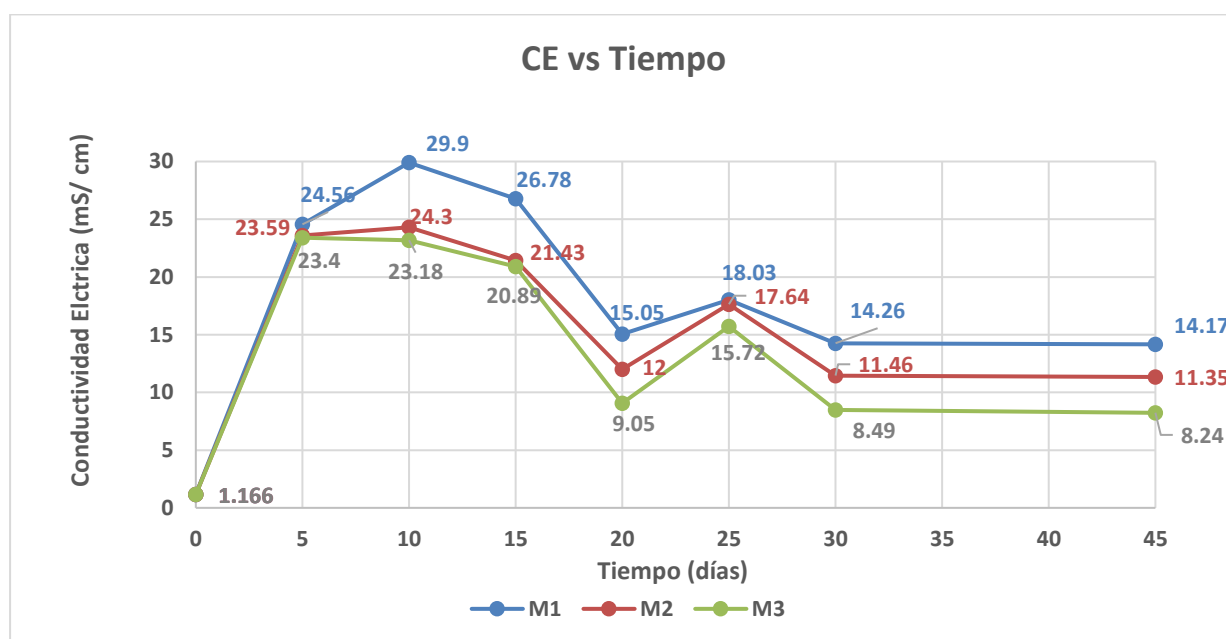


Los resultados muestran un comportamiento ligeramente ascendente y descendente de los niveles de pH en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta una variación con ascenso y descenso que va desde 6.51 hasta 6.49, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otro ligero ascenso y descenso en los tiempos monitoreados que van desde 6.51 hasta 6.66; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta un ascenso y descenso en los tiempos monitoreados con niveles que van desde 6.51 hasta 6.85. En los tres sistemas de tratamiento se aprecia que para los días de tratamiento 5, 15 y 45 se tuvieron niveles de Ph por debajo de los Límites Máximos Permisibles de acuerdo con la norma del DS N° 003-2010-MINAM.

4.2.1.2. Conductividad Eléctrica (C.E). Subsiguientemente, en la Figura 18, permite observar el resultado de la Conductividad Eléctrica para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 18

Resultados de la Conductividad Eléctrica para los tres sistemas de tratamiento

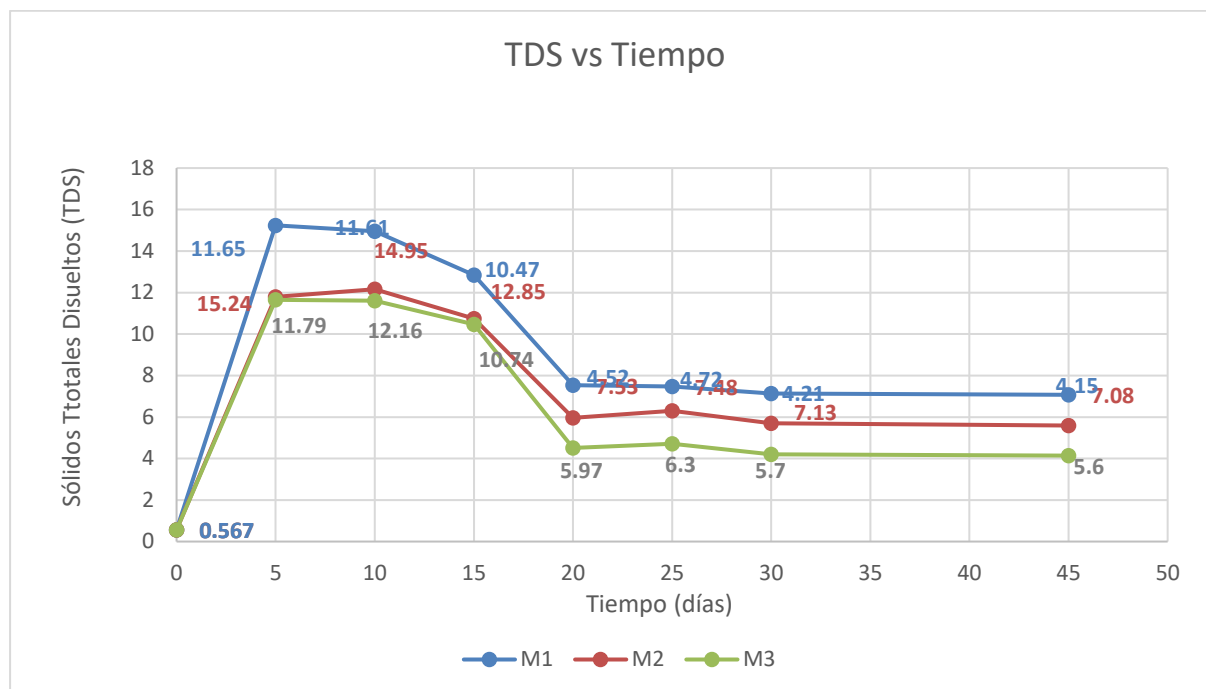


Los resultados de la Conductividad Eléctrica muestran un comportamiento ascendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta un ascenso que va desde 1.166 mS/cm hasta los 14.17 mS/cm, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta un ascenso que van desde los 1.166 mS/cm hasta los 11.35 mS/cm; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta un ascenso con valores que van desde los 1.166 mS/cm hasta los 8.24 mS/cm. En todos los casos, los resultados obtenidos se pueden deber al proceso de filtrado o precipitado. Para el caso de la Conductividad Eléctrica no se cuenta con LMP para casos de comparación.

4.2.1.3. Sólidos Totales Disueltos (TDS). Subsiguientemente, en la Figura 19 permite observar el resultado de los TDS:

Figura 19

Resultados de los Sólidos Totales Disueltos para los tres sistemas de tratamiento

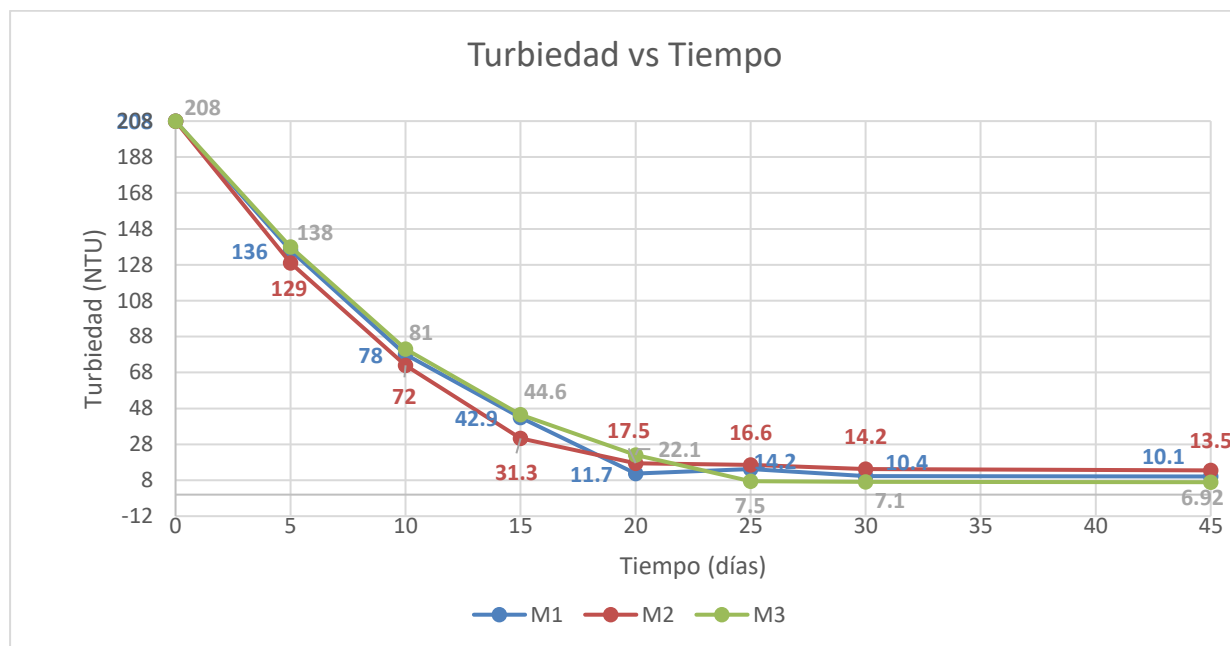


Los resultados de TDS muestran un comportamiento ascendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta un ascenso que va desde 0.567 g/l hasta los 4.15 g/l, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta un incremento que va desde los 0.567 g/l hasta los 7.08 g/l; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta un ascenso en los tres tiempos monitoreados con valores que van desde los 0.567 g/l hasta los 5.6 g/l. En todos los casos, los resultados obtenidos se pueden deber al grado de mineralización alcanzada al término de cada uno de los tiempos de tratamiento analizados. Para el caso de los Sólidos Totales Disueltos no se cuenta con Límites Máximos Permisibles para casos de comparación.

4.2.1.4. Turbiedad (TB). Subsiguientemente, en la Figura 20, permite observar el resultado de Turbiedad para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 20

Resultados de Turbiedad para los tres sistemas de tratamiento

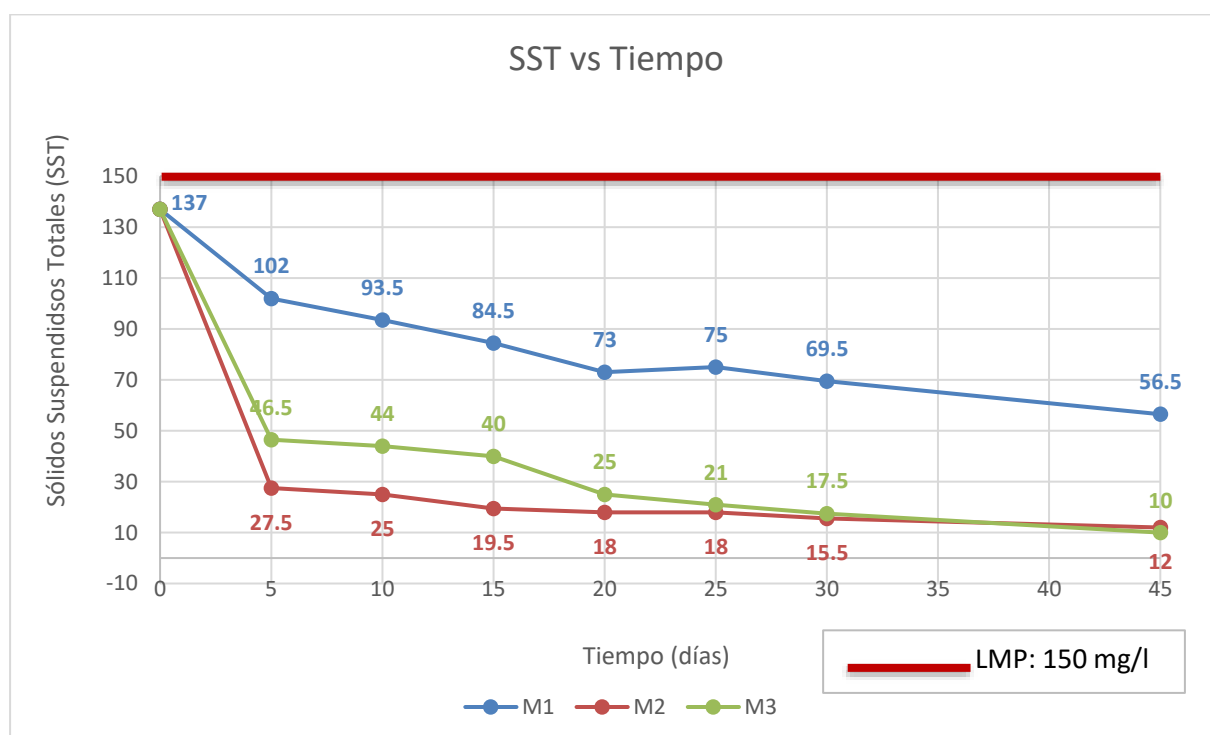


Los resultados de Turbiedad muestran un comportamiento descendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta una reducción que va desde 208 NTU hasta los 10.1 NTU (197.9 NTU de erradicación), de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otra reducción que van desde los 208 NTU hasta los 13.5 NTU (194.5 NTU de erradicación); y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta una reducción en los tres tiempos monitoreados, con valores que van desde los 208 NTU hasta los 6.92 NTU (201.08 NTU de erradicación). En todos los casos, los porcentajes de erradicación se pueden deber a la biodegradación alcanzada de los compuestos que generan turbiedad al culminar los tiempos de tratamiento. Para el caso de la Turbiedad no se cuenta con Límites Máximos Permisibles para casos de comparación.

4.2.1.5. Sólidos Suspendidos Totales (SST). Subsiguientemente, en la Figura 21, permite observar el resultado de los SST para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 21

Resultados de Sólidos Suspendidos Totales



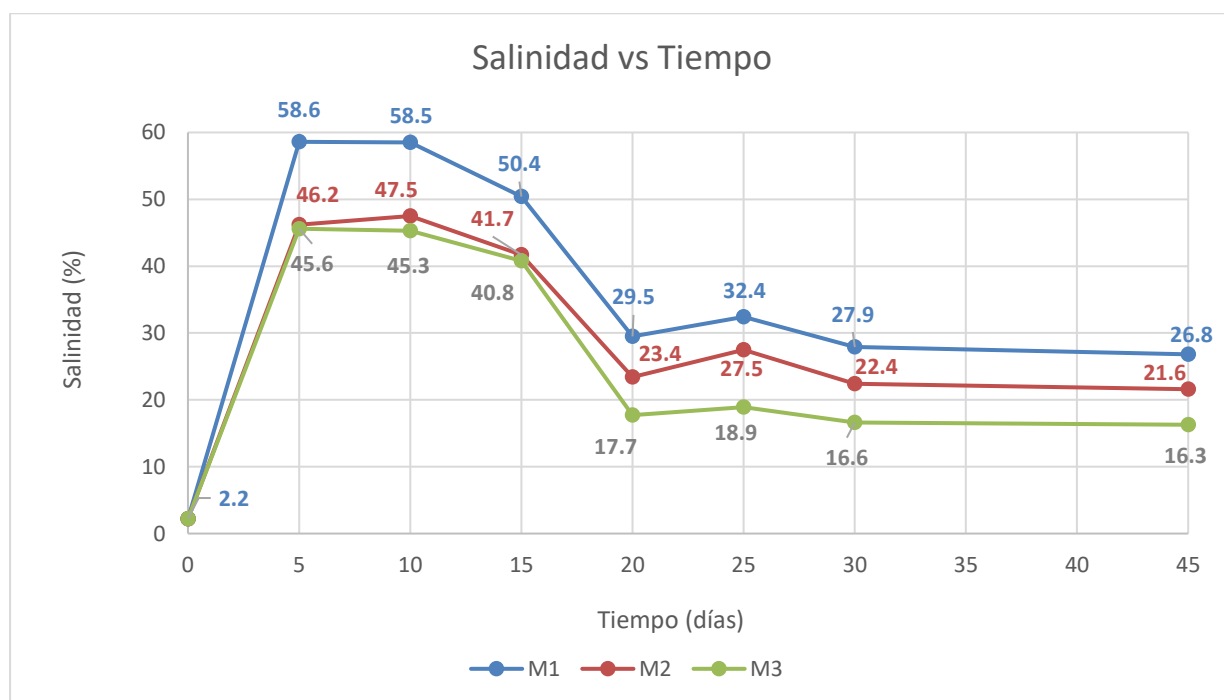
Los resultados de SST muestran un comportamiento descendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta una reducción que va desde 137 mg/l hasta los 56.5 mg/l (80.5 mg/l de erradicación), de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otra reducción que van desde los 137 mg/l hasta los 12 mg/l (125 mg/l de erradicación); y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta una reducción en los tres tiempos monitoreados con valores que van desde los 137 mg/l hasta los 10 mg/l (127 mg/l de erradicación). En todos los casos, los porcentajes de erradicación se pueden deber a la biodegradación alcanzada de los sólidos en suspensión

culminados los tiempos de tratamiento. Para los tres sistemas de tratamiento se alcanza con el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (150 mg/l).

4.2.1.6. Salinidad. Subsiguientemente, en la Figura 22, permite observar el resultado de Salinidad para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 22

Resultados de Salinidad de los 3 humedales



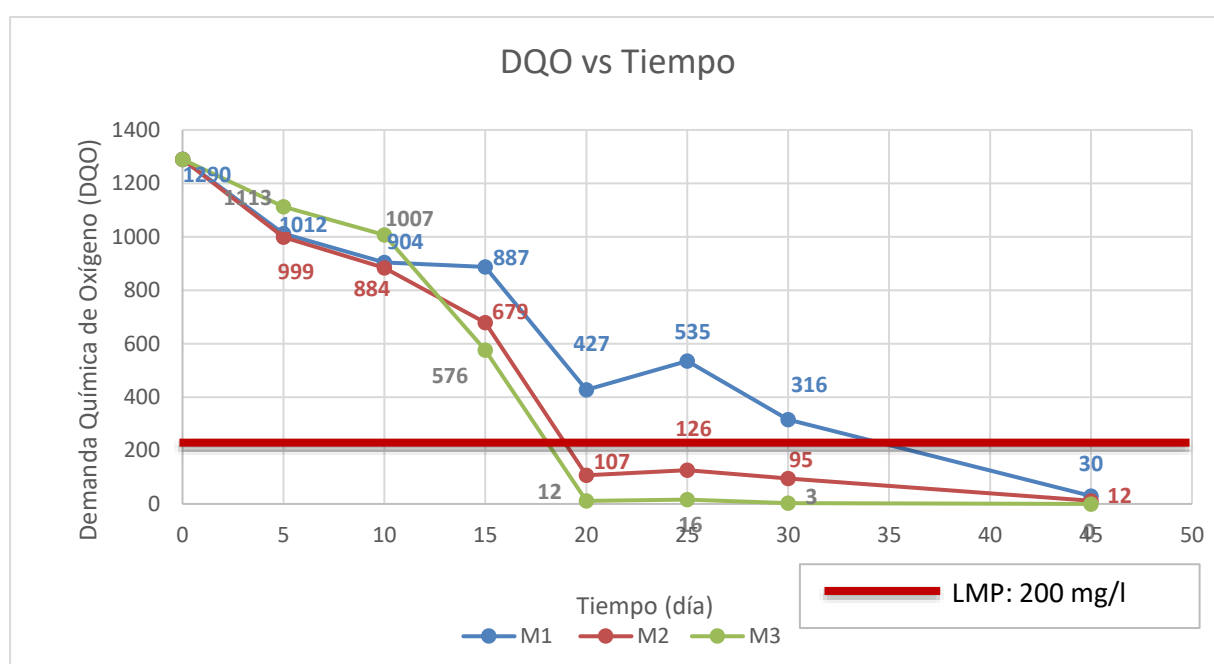
Los resultados de la Salinidad muestran un comportamiento ascendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta un aumento que va desde 2.2 mg/l hasta los 26.8 mg/l, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otro ascenso que van desde los 2.2 mg/l hasta los 21.6 mg/l; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta un incremento con valores

que van desde los 2.2 mg/l hasta los 16.3 mg/l. Para el caso de la salinidad no se cuenta con Límites Máximos Permisibles para casos de comparación.

4.2.1.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO). Subsiguientemente, la, permite observar el resultado de la DQO para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 23

Resultados de la Demanda Química de Oxígeno



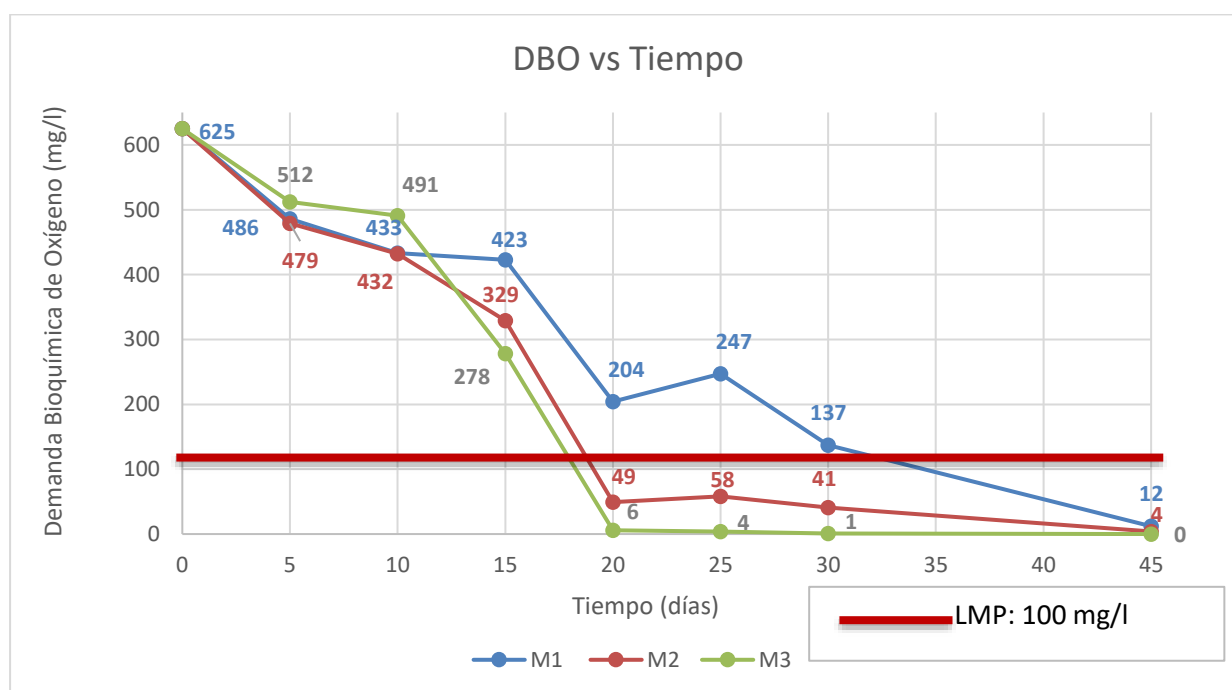
Los resultados de la DQO muestran un comportamiento descendente de sus niveles en cada uno de los tiempos monitoreados, así tenemos por ejemplo para el sistema de tratamiento H1, presenta una reducción que va desde 1290 mg/l hasta 30 mg/l al terminar el tratamiento, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otra reducción que van desde los 1290 mg/l hasta 12 mg/l ; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta reducciones en los tiempos monitoreados con valores que van desde los 1290 mg/l hasta 0 mg/l. En todos los casos, los porcentajes de erradicación se pueden deber a la biodegradación alcanzada de la materia orgánica culminados los tiempos de tratamiento. Para los tres sistemas de tratamiento

al finalizar los 45 días se alcanza con el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (200 mg/l).

4.2.1.8. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Subsiguientemente, la, permite observar el resultado de la DBO para los tres sistemas de tratamiento H1, H2 y H3.

Figura 24

Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno



Los resultados de la DBO muestran un comportamiento ascendente y descendente de sus niveles en diferentes tiempos de tratamiento monitoreados, así tenemos para el sistema de tratamiento H1, presenta una reducción que va desde 625 mg/l hasta 12 mg/l, de igual forma, el sistema de tratamiento H2, presenta otra reducción que van desde los 625 mg/l hasta los 4 mg/l; y finalmente el sistema de tratamiento H3, también presenta una reducción en los tres tiempos monitoreados con valores que van desde los 625 mg/l hasta los 0 mg/l. En los 3 sistemas, los porcentajes de erradicación varían según los tiempos y puede ser por la biodegradación alcanzada de la materia orgánica culminados los tiempos de tratamiento. Para

los tres sistemas de tratamiento al finalizar el día 45 se alcanza con el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (100 mg/l), lo cual no sucede en otros tiempos.

4.2.1.9. Fósforo Total y Nitrógeno Total. Adicionalmente, se evaluó el contenido de fósforo total y nitrógeno total al día 45 del tratamiento en los 3 humedales.

Tabla 19

Datos de la muestra analizada

Código Interno de Muestra	Tipo de Muestra	Descripción
S-2975	Agua	HUMEDAL 1
S-2976	Agua	HUMEDAL 2
S-2977	Agua	HUMEDAL 3

Nota: Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. SLAB.

Tabla 20

Resultados obtenidos del análisis

Parámetro	Unidad	Método	Resultado S-2975	Resultado S-2976	Resultado S-2977
Fósforo Total	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500 P, 23 rd Ed	0.11	< 0.01	< 0.01
Nitrógeno Total	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500 N, 23 rd Ed	3.93	< 0.01	< 0.01

Nota: Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. SLAB.

Los resultados serán comparados con lo indicado en la Tabla 21, que muestra la composición típica del agua residual doméstica bruta según (Metcalf & Eddy, 2005).

Tabla 21

Composición típica del agua residual doméstica bruta

Contaminantes	Unidades	Débil	Media	Fuerte
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15

Nota: Metcalf & Eddy (2005)

Los valores de fósforo total en los humedales son extremadamente bajos en comparación con los valores típicos del agua residual doméstica bruta, lo que indica una alta eficiencia en la eliminación del fósforo total en los tres sistemas evaluados.

Especialmente en los humedales H2 y H3, donde los valores son menores al límite de detección (< 0.01 mg/L), se sugiere que estos sistemas eliminan casi todo el fósforo presente en el agua.

Los valores de nitrógeno total en los humedales también son significativamente inferiores a los valores típicos del agua residual doméstica bruta, lo que indica una eficiente remoción del nitrógeno total.

En los humedales H2 y H3, el nitrógeno total es prácticamente inexistente (< 0.01 mg/L), mientras que el humedal H1 muestra un leve residuo (3.93 mg/L), que sigue siendo muy bajo en comparación con el rango típico más bajo (20 mg/L).

4.3 Eficiencias alcanzadas por cada sistema de tratamiento

Finalizados los tiempos de tratamiento, se determinó las eficiencias correspondientes a cada sistema de tratamiento H1, H2 y H3; con sus respectivos parámetros indicadores, según se detallan Subsiguientemente:

4.3.1 Eficiencias alcanzadas para Turbiedad

El cálculo de las eficiencias de la Turbiedad se determinó considerando la concentración inicial del primer monitoreo en el día cero, y la concentración final para los días 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 45.

Tabla 22

Eficiencias alcanzadas para Turbiedad

TURBIEDAD												
Sistemas de Tratamiento	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia
	0	5 días		10 días	15 días		20 días	25 días				
	□ Inicial (NTU)	□ Final (NTU)	%	□ Final (NTU)	%	□ Final (NTU)	%	□ Final (NTU)	%	□ Final (NTU)	%	
H1	208	136	34.61	78	62.5	42.9	79.38	11.7	94.38	14.2	93.17	
H2	208	129	37.98	72	65.38	31.3	84.66	17.5	91.59	16.6	92.02	
H3	208	138	33.65	81	61.06	44.6	84.95	22.1	89.38	7.5	96.39	

TURBIEDAD				
Sistemas de Tratamiento	Tiempo	Eficiencia	Tiempo	Eficiencia
	30 días		45 días	
	[] Final (NTU)	%	[] Final (NTU)	%
H1	10.4	95	10.1	95.14
H2	14.2	93.17	13.5	93.51
H3	7.1	96.59	6.92	96.67

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tiempos de tratamiento, se aprecia que el sistema de tratamiento H3, presenta una mayor eficiencia al final del tratamiento con 96.67 %, sobre los otros sistemas de tratamientos H1 y H2 quienes alcanzaron 95.14 y 93.51 %.

4.3.2. Eficiencias alcanzadas para Solidos Suspendidos Totales

El cálculo de la eficiencia de los Solidos Suspendidos Totales se determinó considerando la concentración inicial del primer monitoreo y la concentración final para los días 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 45.

Tabla 23*Eficiencias alcanzadas para Solidos Suspendidos Totales*

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES												
Sistemas de Tratamiento	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia
	0	5 días		10 días	15 días		20 días	25 días				
	[] Inicial (mg/l)	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	
H1	137	102	32.71	93.5	31.75	84.5	38.32	73	46.71	75	45.23	
H2	137	27.5	79.93	25	81.75	19.5	85.77	18	86.86	18	86.86	
H3	137	46.5	66.06	44	67.88	40	70.8	25	81.75	21	84.67	

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES				
Sistemas de Tratamiento	Tiempo		Tiempo	
	30 días	Eficiencia	45 días	Eficiencia
	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%
H1	69.5	49.27	56.5	58.76
H2	15.5	88.89	12	91.24
H3	17.5	87.23	10	92.7

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tiempos de tratamiento, se aprecia que el sistema de tratamiento H3, presenta una mayor eficiencia al final del tratamiento con 92.7%, sobre los otros sistemas de tratamientos H1 y H2 quienes alcanzaron 58.76y 91.24 % respectivamente.

4.3.3. Demanda Química de Oxígeno

El cálculo de la eficiencia de la Demanda Química de Oxígeno se determinó considerando la concentración inicial del primer monitoreo y la concentración final en el día 45.

Tabla 24

Eficiencias alcanzadas para la Demanda Química de Oxígeno

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO												
Sistemas de Tratamiento	Tiempo 0		Eficiencia %	Tiempo 10 días		Eficiencia %	Tiempo 15 días		Eficiencia %	Tiempo 20 días		Eficiencia %
	[] Inicial (mg/l)	[] Final (mg/l)		[] Final (mg/l)	[] Final (mg/l)		[] Final (mg/l)	[] Final (mg/l)		[] Final (mg/l)		
H1	1290	1012	21.55	904	29.92	887	31.24	427	86.89	535	58.53	
H2	1290	999	22.56	884	31.47	679	47.36	107	91.71	126	90.23	
H3	1290	1113	13.72	1007	21.94	576	55.35	12	99.07	16	98.76	

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO				
Sistemas de Tratamiento	Tiempo 30 días		Tiempo 45 días	
	[] Final (mg/l)	Eficiencia %	[] Final (mg/l)	Eficiencia %
H1	316	75.5	30	97.67
H2	95	92.64	12	99.07
H3	3	99.77	0	100

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tiempos de tratamiento, se aprecia que el sistema de tratamiento H3, presenta una mayor eficiencia al final del tratamiento con 100 % de erradicación, sobre los otros sistemas de tratamientos H1 y H2 quienes alcanzaron 97.67 y 99.07 % respectivamente.

4.3.4. Eficiencias alcanzadas para la Demanda Bioquímica de Oxígeno

La eficiencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno se determinó considerando la concentración inicial del primer monitoreo y la concentración final en el día 45.

Tabla 25

Eficiencias alcanzadas para la Demanda Bioquímica de Oxígeno

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO												
Sistemas de Tratamiento	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia	Tiempo		Eficiencia
	0	5 días		10 días	15 días		20 días	25 días				
	[] Inicial (mg/l)	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%	
H1	625	486	22.24	433	30.72	423	32.32	204	67.36	247	60.48	
H2	625	479	23.36	432	31.47	329	47.36	49	92.16	58	90.72	
H3	625	512	18.08	491	30.88	278	55.52	6	99.04	4	99.36	

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO				
Sistemas de Tratamiento	Tiempo	Eficiencia	Tiempo	Eficiencia
	30 días		45 días	
	[] Final (mg/l)	%	[] Final (mg/l)	%
H1	137	78.08	12	98.08
H2	41	93.44	4	99.36
H3	1	99.84	0	100

De acuerdo con los resultados obtenidos en los tiempos de tratamiento, se aprecia que el sistema de tratamiento H3, presenta una mayor eficiencia al final del tratamiento con 100 %, sobre los otros sistemas de tratamientos H1 y H2 quienes alcanzaron 98.08 y 99.36% respectivamente.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cotrina et al. (2019) llevaron a cabo un estudio enfocado en el "Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un sistema de biofiltro a base de conchas de abanico (*Argopecten purpuratus*) en San Andrés de Huacar, Distrito de Paccho - Huaura", con el propósito de optimizar el tratamiento de aguas residuales domésticas y mejorar significativamente los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de carga orgánica. Los hallazgos de este estudio revelaron que, si bien la temperatura se mantuvo estable en 20 °C y el pH fluctuó entre 12 y 13, se logró una reducción del 56.17% en SST, 82.73% en DBO5, y 78.62% en DQO, junto con disminuciones en el OD y la conductividad eléctrica a lo largo de los intervalos de tiempo T1-15 a T3-45, siendo T2-30 el más efectivo.

En contraste, nuestra investigación empleó tres sistemas de tratamiento por humedales artificiales, logrando eficiencias superiores en la eliminación de contaminantes comparadas con las reportadas por Cotrina et al. (2019). En el primer sistema (H1), se observaron eficiencias del 58.76% para SST, 95.14% para turbiedad, 98.08% para DBO y 97.67% para DQO. El segundo sistema (H2) mostró un rendimiento del 91.24% para SST, 93.51% para turbiedad, 99.36% para DBO y 99.07% para DQO. Finalmente, el tercer sistema (H3) alcanzó una eficiencia del 92.7% para SST, 96.67% para turbiedad, y 100% tanto para DBO como para DQO. Estas mejoras en la eficiencia, en comparación con el estudio previo, pueden atribuirse a los mayores tiempos de retención hidráulica (TRH) empleados en nuestro trabajo.

La investigación de Tapia (2019), titulada "Biofiltro para tratamiento de aguas residuales en la granja porcina 'Ángel María'", exploró una solución de biorremediación para el agua residual de una granja porcina, analizando tanto el agua potable utilizada en la limpieza como el agua residual resultante y el agua tratada mediante el biofiltro. Los resultados mostraron reducciones significativas en varios parámetros, incluyendo una disminución en coliformes fecales del 99%, sólidos totales en

77.1%, sólidos disueltos en 86%, y sólidos suspendidos totales en 45.6%, con una reducción de nitratos en 26.4%, DQO en 67.7%, y DBO5 en 73.8%. Se observó una tendencia hacia la neutralidad en el pH y un incremento del 49.3% en la conductividad eléctrica.

Comparativamente, en nuestra investigación utilizando tres sistemas de tratamiento de humedales artificiales, se lograron eficiencias variables y en general superiores en la eliminación de contaminantes respecto a lo reportado por Tapia (2019). Por ejemplo, el primer sistema (H1) alcanzó una eficiencia del 95.14% en turbiedad, 58.76% en sólidos suspendidos totales, 98.08% en demanda bioquímica de oxígeno y 97.67% en demanda química de oxígeno. El segundo sistema (H2) mostró una eficiencia del 93.51% en turbiedad, 91.24% en sólidos suspendidos totales, 99.36% en DBO y 99.07% en DQO. El tercer sistema (H3) obtuvo 96.67% de eficiencia en turbiedad, 92.7% en sólidos suspendidos totales, y 100% tanto en DBO como en DQO. Además, se registró un aumento del pH de 6.51 a 6.85 y un incremento en la conductividad eléctrica de 1.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 8.24 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a diferencia del aumento significativo reportado por Tapia. Estos resultados reflejan una eficiencia de tratamiento generalmente superior en nuestra investigación, con la excepción de la conductividad eléctrica.

Por otro lado, la investigación realizada por Quispe (2018), titulada "Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica", se enfocó en comparar la efectividad de dos sistemas piloto de biofiltros a través de un análisis exhaustivo de parámetros físico-químicos y microbiológicos. Analizando un total de 25 muestras de cinco puntos de muestreo diferentes, se determinó que el Biofiltro 1 mostró una mayor eficiencia en la eliminación de SST, DBO5 y CT, con eficacias de 95.71%, 91.55%, y 99.87%, respectivamente. En paralelo, nuestro estudio también reveló eficiencias de erradicación notables en tres tratamientos diferenciados (H1, H2, y H3), logrando porcentajes de 98.08%, 99.36%, y 100% en la reducción de DBO; 97.67%, 99.07%, y 100% en la disminución de DQO; 95.14%, 93.51%, y 96.67% en la mejora de la turbidez; y 58.76%,

91.24%, y 92.7% en la reducción de SST. Similar a los hallazgos de Quispe (2018), nuestro sistema H3 evidenció un incremento en los niveles de pH de 6.51 a 6.85, reflejando un ajuste hacia la neutralidad a medida que avanzaba el tiempo de retención hidráulica. Este paralelismo subraya la consistencia en la eficacia de los sistemas de biofiltros y humedales artificiales para optimizar la calidad del agua tratada, destacando la importancia del tiempo de retención hidráulica como un factor crítico para optimizar los hallazgos del tratamiento de aguas residuales.

VI. CONCLUSIONES

- ❖ La evaluación inicial del agua residual en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas María Reiche indicó que los niveles de pH y sólidos suspendidos totales (137 mg/l) se mantienen dentro de los límites máximos permitidos (LMP). Sin embargo, las mediciones de la demanda bioquímica de oxígeno (625 mg/l) y la demanda química de oxígeno (1290 mg/l) superaron los LMP establecidos por la Norma DS N° 003-2010-MINAM, fijados en 100 y 200 mg/l, respectivamente.
- ❖ En cuanto a los tres sistemas de tratamiento mediante humedales artificiales evaluados, el sistema H3 demostró ser el más eficaz en la reducción de la turbidez, registrando 6.92 NTU. Este mismo sistema también logró la mayor disminución en los niveles de DBO y DQO, con una eficiencia de erradicación del 100%, así como en los SST, alcanzando 10 mg/l, y 6.92 NTU para la turbidez.
- ❖ Los hallazgos sugieren que el sistema H3 fue el más efectivo en eliminar la materia orgánica durante un periodo de retención hidráulica de 45 días, obteniendo una eficiencia de erradicación del 100% tanto para DBO como para DQO, 92.7% para los sólidos suspendidos totales y 96.67% en la reducción de la turbidez.
- ❖ Al comparar los tres sistemas de tratamiento, H1, H2 y H3, se observa que logran altas eficiencias de erradicación de materia orgánica, cumpliendo con los Límites Máximos Permisibles al finalizar el tratamiento en el día 45 para parámetros como sólidos suspendidos totales, DQO y DBO.
- ❖ La eficiencia observada en los H2 y H3, con respecto a fósforo total y nitrógeno total, es particularmente destacable, ya que logran niveles no detectables de ambos contaminantes. Esto posiciona a los sistemas de humedales como una solución sostenible y eficiente para el tratamiento descentralizado de aguas residuales.

VII. RECOMENDACIONES

- ❖ Para minimizar la contaminación originada por las aguas residuales domésticas de bajo caudal, se sugiere optar por métodos de biofiltración o el uso de humedales artificiales. Estas alternativas han demostrado ser altamente eficientes en la eliminación de materia orgánica en aguas con concentraciones contaminantes de nivel medio a bajo, ofreciendo además la ventaja de tener costos operativos reducidos y ser respetuosos con el medio ambiente.
- ❖ Basándose en la caracterización de las aguas residuales domésticas realizada en este estudio, que se centró en contaminantes de carga media, sería beneficioso llevar a cabo investigaciones adicionales con aguas residuales que presenten mayores cargas orgánicas. Esto permitiría evaluar si se pueden lograr eficiencias similares a las obtenidas en nuestro estudio bajo condiciones de mayor contaminación.
- ❖ Para preservar las condiciones ambientales y operativas óptimas del sistema de tratamiento, es crucial realizar un seguimiento continuo de los parámetros como la temperatura y el pH. Esto garantizará el adecuado funcionamiento del tratamiento, evitando la influencia negativa de factores como la presencia de ácidos o la exposición a la radiación solar que podrían comprometer la eficacia del proceso.
- ❖ Además, se aconseja experimentar con distintos componentes, distintos a los empleados en este estudio, para perfeccionar el sistema de tratamiento. Explorar nuevas opciones podría conducir al descubrimiento de métodos más eficaces para la erradicación de la DBO y la DQO, indicadores clave de la presencia de materia orgánica en las aguas residuales domésticas, mejorando así los tiempos de tratamiento y la eficiencia general del proceso.

VIII. REFERENCIAS

- Abello-Passteni, V., Muñoz, E., Lira, S., & Garrido-Ramírez, E. (2020). Evaluación de eco-eficiencia de tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas en Chile. *Tecnología y ciencias del agua* (pp-222).
- Álvarez, R. (2005). *Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro*. [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://files01.core.ac.uk/download/pdf/71845366.pdf
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (25 de 07 de 2020). *Autoridad Nacional del Agua*. <https://www.ana.gob.pe/contenido/el-agua-en-cifras>
- Baeza, E. (2018). *Sequía y Escasez Hídrica: conceptos relacionados, situación actual y experiencia comparada en varios países para abordar el problema*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25169/2/Informe_Escasez_Hidrica.pdf
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). *Innovaciones en el Desarrollo e Implementación de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Latinoamérica y El Caribe*. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Innovaciones-en-el-desarrollo-e-implementacion-de-humedales-construidos-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-domesticas-en-Latinoamerica-y-El-Caribe.pdf>
- Banco Mundial. (19 de 03 de 2020). *Las aguas residuales no son un residuo*. <https://www.bancomundial.org/es/news/video/2020/03/19/wastewater-is-not-a-waste>

- Cabral, J. (2010). Microbiología del agua. Patógenos Bacterianos y Agua. *Basilea: International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(10):3657-703. doi: 10.3390/ijerph7103657.
- Castillo, G. (Ed.) (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Chacón, M., Villamarín, S., & Álvarez, R. (2013). Pruebas de toxicidad aguda CL (I) 50 en camarones marinos (*Litopenaeus schmitti* y *L. vannamei*) 105 utilizando efluentes industriales a la Bahía de Cartagena, Colombia. *Biosalud* 12 (2), http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95502013000200004
- Cotrina, R., Farfán, J., Flores, J., & Tesen, A. (2019). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un sistema de biofiltro a base de conchas de abanico (Argopecten purpuratus) en el poblado de San Andrés de Huacar, Distrito de Paccho - Huaura*. [Trabajo de Investigación para obtener el grado académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental. Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35550>
- Delgadillo, O., Pérez, L., Camacho, A., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://files01.core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf](https://files01.core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf)
- Díaz, E., Alvarado, A. y Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del SUTRANE en San Miguel Almaya. Toluca, México, *Quivera*, 14 (1), 78-97, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf)

- Egoavil, G. (2018). *Implementación de humedal artificial en el tratamiento de agua residual doméstica del proyecto Don Javier 79, Yarabamba - Arequipa*. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio de la Universidad Nacional Federico Villarreal. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNF_b5ed2af9a564429388140f9e0980d994/Details
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma.
- García, J., y Corzo, A. (Ed.). (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. *Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya*.
- Garzón, M. (2004). La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de aguas residuales industriales. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. <https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/515>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw Hill Education.
- Hoffmann, H., & Platzer, C. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. *ECOSAN*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Revision-Tecnica-de-Humedales-Artificiales.pdf
- Insignares, K. (2013). *Potencial de producción de biomasa para la generación de energía a partir de sistemas de tratamiento de aguas residuales con base a humedales artificiales de medio suspendido*. [Trabajo de grado para optar el Título de Ecólogo]. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/ae5c5108-2340-41d0-8d92-b58fe0b2e0aa/content

Lara, J. (2000). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*. [Tesis de Maestría para optar el grado de Maestro en Ingeniería y Gestión Ambiental. Universidad de Politécnica de Cataluña]. Repositorio de la Universidad Politécnica de Cataluña. https://www.researchgate.net/publication/281450049_DEPURACION_DE_AGUAS_RESIDUALES_URBANAS_MEDIANTE_HUMEDALES_ARTIFICIALES

López, S. y Martín, S. (2015). *Depuración de aguas residuales (5.1 ed.)*. Editorial Elearning S.L. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.editorialelearning.com/catalogo/media/iverve/uploadpdf/1526032326_UF1666_demo.pdf

Mara, D. (2013). *Tratamiento de aguas residuales domésticas en países en desarrollo*. Earthscan. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bdd.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf

Mateo-Sagasta, J. (2017). *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe*. Estado, principios y necesidades. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://openknowledge.fao.org/items/b64fd9fe-24f3-4587-9394-a04fb0d3da2b>

Metcalf y Eddy. (2005). *Ingeniería de aguas residuales (3 ed., vol.1)*. McGraw-Hill.

Ministerio del Ambiente. (2010). *Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>

- Ministerio del Ambiente. (2017). *Aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias*.
<https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Muñoz, R. (2009). *Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Tamiahua, Veracruz*. [Tesis de grado, Universidad de las Américas Puebla]. Repositorio de la Universidad de Puebla.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/munoz_c_r/capitulo3.pdf de:
 Universidad de las Américas Puebla.
- Navarro, A., García, Y., Vásquez, A., & Marrugo, J. (2013). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4 (1), 39-50. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627689004.pdf>
- Oalkey, S., & Salguero, L. (2011). *Tratamiento de aguas residuales domésticas en Centroamérica*. Washington D.C.: Un Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.oefa.gob.pe/server/api/core/bitstreams/a9bbc727-6110-4fb0-9b16-8eabc51cf392/content>
- Osorio, F., Sánchez, M., & Torres, J. (2011). Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. *Díaz de Santos*. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479789039.pdf>

- Peña, C., Carter, D., y Ayala, F. (2001). *Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. Distributed on the Internet via the Southwest Hazardous Waste Program website at <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>.
- Quispe, A. (2018). *Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho Chosica*. [Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio de la Universidad Nacional Federico Villarreal. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.unfv.edu.pe/server/api/core/bitstreams/695ca7a5-8429-4def-8c8f-4acc182d5743/content>
- Rabat, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. [Trabajo de Fin de Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. Universidad de Alicante]. Repositorio de la Universidad de Alicante. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/7b80fbda-97bb-4710-b9fa-29987299c322/content>
- Ramirez, K. y Paredes, M. (2019). *Evaluación de dos especies macrófitas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en la remoción de contaminantes microbiológicos y químicos a través de un sistema de biofiltro en aguas residuales domésticas, Tarapoto-2018*. [Tesis para optar el Título de Ingeniera Ambiental. Universidad César Vallejo]. Repositorio de la universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39476>
- RAMSAR. (2013). *Manual de la convención de Ramsar* (6ta Ed. ed.): Guía a la Convención sobre los Humedales. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf>
- Raschid-Sally, L., & Jayakody, P. (2008). Drivers and Characteristics of Wastewater Agriculture in Developing Countries: Results from a Global Assessment. *Colombo: Instituto Internacional de Gestión de Recursos Hídricos - Informe de investigación N° 127 del IWMI*.

https://www.researchgate.net/publication/242230848_Drivers_and_Characteristics_of_Wastewater_Agriculture_in_Developing_Countries_Results_from_a_Global_Assessment

Romero, L. (2016). *Diseño de un sistema de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales que llegan de manera directa al humedal neutro en el municipio de Soacha*. [Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Libre]. Repositorio de Universidad Libre. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/8906/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/8906/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sánchez, D. (2013). *Diseño y modelización de humedales para el tratamiento de efluentes de depuradora. Aplicación en el entorno del parque nacional de Las Tablas de Daimiel*. [Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha]. Repositorio de la Universidad de Castilla. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=88007>

Tapia, M. (2019). *Biofiltro para tratamiento de aguas residuales en la granja porcina “Ángel María”*. [Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniera Ambiental y Manejo de Riesgos Naturales. Universidad UTE]. Repositorio de la Universidad UTE. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.ute.edu.ec/server/api/core/bitstreams/59cc8679-d1ba-48cc-bae4-9cc4d7d07e33/content](https://repositorio.ute.edu.ec/server/api/core/bitstreams/59cc8679-d1ba-48cc-bae4-9cc4d7d07e33/content)

Tejedor, J. (2019). *Estudio del comportamiento de Eisenia foetida y Schoenoplectus californicus en biofiltros de cáscara de maní para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. [Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero Ambiental. Escuela Politécnica nacional]. Repositorio de la escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20430>

Trapote-Jaume, A. (2016). Tecnologías de depuración y reutilización: nuevos enfoques. *Alicante: Agua y Territorio*, (8). DOI: <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3295>

Trapote-Jaume, A. (2016). Tecnologías de depuración y reutilización: nuevos enfoques. *Alicante: Agua y Territorio*, (8). DOI: <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3295>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2017).

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017.

Aguas residuales: El recurso desaprovechado.

https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247553_spa

Vera, I. (2012). *Análisis de funcionamiento y patrones asociativos de sistemas de tratamiento convencionales y naturales de aguas servidas para la eliminación de materia orgánica y nutrientes*. [Tesis de grado para obtener el grado de Doctor en Ciencias Ambientales mención Sistemas Acuáticos Continentales. Universidad de Concepción]. Repositorio de la Universidad de Concepción.

Vymazal, J. (2008). *Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: una revisión*. Instituto de Biología de Sistemas y Ecología, Academia Checa de Ciencias, Dukelská 145, 379.

https://www.researchgate.net/publication/228407635_Constructed_Wetlands_for_Wastewater_Treatment_A_Review

Younger, P. (2002). The adoption and adaptation of passive treatment technologies for mine waters in the United Kingdom. *Mine Water Env.*, 19(2), 84–97. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.wolkersdorfer.info/gard/refbase/search.php?sqlQuery=SELECT%20author%2C%20title%2C%20type%2C%20year%2C

IX. ANEXOS

ANEXO A. Matriz de Consistencia.

Evaluación de la eficiencia entre tres humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, 2021.						
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables			
Problema Principal	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
¿Cuál de los tres humedales artificiales subsuperficiales será el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas?	Evaluar la eficiencia entre tres humedales artificiales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas.	El humedal artificial HS1 será más eficiente que el sistema de biofiltro HS2 para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.	Humedales artificiales subsuperficiales	Sustrato	Tipo de sustrato	-
				Vegetación	Tipo de vegetación	-
				Dimensiones del humedal	Caudal	H3/día
					Área Superficial	H2
					Ancho	m
					Alto	m
Tiempo de retención hidráulico	dia					
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida
¿Cómo se encontrarán las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual, antes del tratamiento con humedales artificiales subsuperficiales?	Determinar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual antes del tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales.	Las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua residual después del tratamiento de humedales artificiales subsuperficial, con respecto al inicial, será inferior.	Tratamiento de aguas residuales domésticas	Parámetros fisicoquímicos	Temperatura	°C
					Potencial de Hidrógeno	Ph
					Conductividad Eléctrica	µs/cm
TDS	mg/L					
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L					
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L					
Amonio (NH4 +)	mg/L					
Fosfato (PO4 -3)	mg/L					
Aceites y grasas	mg/L					
¿Cómo se encontrarán las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos con relación a los límites máximos permisibles, después del tratamiento con humedales artificiales subsuperficiales?	Comparar los límites máximos permisibles con las concentraciones finales obtenidas en el tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales.	Los resultados de la calidad del efluente después del tratamiento de humedales artificiales subsuperficiales, no exceden a las normas ambientales vigentes.	Parámetros microbiológicos	Coliformes totales	NMP/100 ml	
				Coliformes fecales	NMP/100 ml	

ANEXO B. Panel Fotográfico



Recolección de especies vegetales.



Construcción de los humedales en el laboratorio de aguas (UNFV)



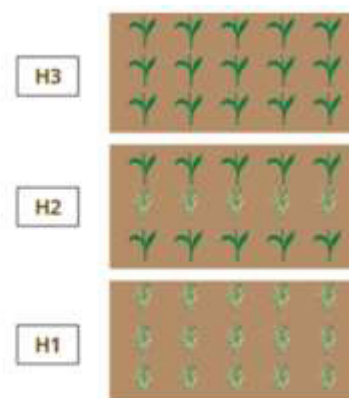
Colocación de las llaves de salida a los humedales.



Instalación de los tubos de los humedales.



Sustratos acondicionados en los humedales.



Distribución de especies vegetales en los humedales.



Siembra de especies vegetales en los humedales.



H1 (*Stipa ichu*)
H2 (*Stipa ichu* y *Phragmites australis*)
H3 (*Phragmites australis*)



Recojo de muestra de aguas residuales PTAR María Raiche.



Humedales en funcionamiento.



Preparación de las muestras para las diferentes evaluaciones.