

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



“EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DE OPERACIÓN
DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA EL
TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL DISTRITO DE
INDEPENDENCIA, LIMA 2022”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

BACH. ALVARADO CANALES ELIZABETH MILAGROS

BACH. BAYONA ESPINOZA LUZ VANESSA

BACH. HUAYHUA GIRON DE DELGADO INES PAMELA

ASESOR:

MTRO. VIGO ROLDAN ABNER JOSUÉ

Callao, 2022

PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



II CICLO TALLER DE TESIS

ANEXO 3

ACTA N° 008-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 38 ACTA N°008-2022 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 17 días del mes de julio del año 2022, siendo las 08:06 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/pdz-iucr-pbo>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Mg.	Edgar Zárate Sarapura	: Presidente
MsC.	María Antonieta Gutiérrez Díaz	: Secretaria
Ing.	Godofredo Teodoro León Ramírez	: Vocal
Mtro.	Abner Josué Vigo Roldán	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de las Bachilleras Ines Pamela Huayhua Giron De Delgado, Luz Vanessa Bayona Espinoza y Elizabeth Milagros Alvarado Canales, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **“EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DE OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL DISTRITO DE INDEPENDENCIA, LIMA 2022”**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa muy bueno y calificación cuantitativa 16, la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099-2021-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por cerrada la Sesión a las 09:09 horas del día domingo 17 de julio del año en curso.



Presidente



Secretaria



Vocal



Asesor

DEDICATORIA

A nuestros padres por todo el amor, sacrificio y confianza por todos estos años; por convertirnos en lo que somos.

A los docentes que nos brindaron el apoyo necesario para el desarrollo de la presente investigación y a Dios por guiarnos siempre.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres y a Dios, por mantenernos firmes e impulsarnos día tras día para seguir adelante y concluir con nuestra investigación.

A nuestro asesor, ing. Abner Josué Vigo Roldán, por la orientación, enseñanza y colaboración en nuestro proyecto.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, por todo el conocimiento adquirido a lo largo de nuestra carrera.

ÍNDICE

INDICE DE TABLAS	4
INDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1. Descripción de la realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema.....	11
1.2.1. Problema General	11
1.2.2. Problemas Específicos	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo General.....	12
1.3.2. Objetivos Específicos	12
1.4. Limitantes de la investigación	12
II. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Antecedentes	14
2.1.1. A nivel Internacional	14
2.1.2. A nivel Nacional.....	17
2.2. Bases teóricas.....	20
2.2.1. Marco legal y normativo	20
2.2.2. Enfoque en las ciencias ambientales	22
2.2.3. Humedal artificial	23
2.2.4. Tratamiento de aguas residuales	30
2.2.5. Aguas residuales	31

2.3.	Marco conceptual.....	33
2.3.1.	Humedales Naturales.....	33
2.3.2.	Humedales Artificiales.....	34
2.3.3.	Tratamiento de Aguas Residuales.....	35
2.3.4.	Reutilización de las aguas residuales.....	36
2.4.	Definición de términos básicos.....	37
III.	HIPOTESIS	39
3.1.	Hipótesis	39
3.1.1.	General.....	39
3.1.2.	Específicas	39
3.2.	Definición conceptual de las variables	39
3.2.1.	Operacionalización de las variables	40
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	42
4.1.	Tipo y diseño de investigación	42
4.1.1.	Tipo de investigación.....	42
4.1.2.	Diseño de investigación.....	42
4.2.	Método de investigación	48
4.3.	Población y muestra.....	48
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado	48
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	48
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	49
V.	RESULTADOS	50
5.1.	Resultados descriptivos	50
5.1.1.	Resultados de las características fisicoquímicos del agua residual doméstica.....	50
5.1.2.	Resultados descriptivos del tratamiento en los humedales	50
5.2.	Resultados inferenciales	61
5.2.1.	Resultados del ANOVA del pH.....	61

5.2.2.	Resultados del ANOVA de la conductividad.....	62
5.2.3.	Resultados del ANOVA de la Turbidez.....	63
5.2.4.	Regresión ANOVA del DQO.....	64
5.2.5.	Regresión ANOVA de los Coliformes Termotolerantes	65
5.2.6.	Regresión ANOVA de los Coliformes Totales	66
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .	67
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	68
6.3.	Responsabilidad ética	70
VII.	CONCLUSIONES.....	72
VIII.	RECOMENDACIONES.....	73
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
X.	ANEXOS.....	81
	ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	81
	ANEXO 2. INSTRUMENTOS VALIDADOS.....	82
	ANEXO 3. DATOS DE TOMA DE MUESTRAS.....	87
	ANEXO 4. FOTOS DEL EXPERIMENTO EN EL LABORATORIO.....	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR.....	22
Tabla 2. ECA para Agua, categoría 3, D1 (C) Riego de vegetales.....	22
Tabla 3. Especificaciones generales del sustrato zeolita.....	27
Tabla 4. Especificaciones generales del sustrato grava	28
Tabla 5. Clasificación científica del juncus spp.....	29
Tabla 6. Clasificación científica de la Chrysopogon zizanioides	29
Tabla 7. Factores que determinan la contaminación del agua	32
Tabla 8. Matriz de operacionalización de las variables.....	41
Tabla 9. Identificación de los humedales artificiales subsuperficiales	45
Tabla 10. Diseño Factorial con Repeticiones para parámetros físicos, químicos y biológicos	47
Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales domésticas.	50
Tabla 12. Resultados experimentales para los parámetros microbiológicos ...	51
Tabla 13. Resultados experimentales para los parámetros físicos-químicos e inorgánicos.....	52
Tabla 14. Descriptivos estadísticos por tipo de sustrato.....	54
Tabla 15. Descriptivos estadísticos por tipo de planta.....	56
Tabla 16. Matriz ANOVA del pH	61
Tabla 17. Matriz ANOVA de la Conductividad	62
Tabla 18. Coeficientes codificados para el modelo de la conductividad	63
Tabla 19. Matriz ANOVA de la Turbidez.....	63
Tabla 20. Coeficientes codificados	64
Tabla 21. Matriz ANOVA del DQO.....	64

Tabla 22. Coeficientes codificados	65
Tabla 23. Matriz ANOVA de los Coliformes Termotolerantes	65
Tabla 24. Matriz ANOVA de los Coliformes Termotolerantes	66
Tabla 25. Comparación de otros estudios que usaron Zeolita como sustrato y este estudio.....	69
Tabla 26. Comparación de otros estudios que usaron otras macrófitas y este estudio	70
Tabla 27. Matriz de consistencia	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los humedales artificiales	24
Figura 2. Humedal artificial subsuperficial horizontal	25
Figura 3. Humedales Naturales.....	34
Figura 4. Relación entre las variables de estudio.....	42
Figura 5. Muestreo del agua residual en la PTAR del distrito de Independencia	43
Figura 6. Humedal artificial construido	44
Figura 7. Tipos de cultivo de macrófitas.....	45
Figura 8. Acondicionamiento del sustrato zeolita en el humedal.....	46
Figura 9. Variación del pH.....	57
Figura 10. Variación de la conductividad.....	58
Figura 11. Variación de la Turbidez.....	59
Figura 12. Variación del DQO	60
Figura 13. Comparación de coliformes totales y Termotolerantes	61

RESUMEN

En esta investigación se buscó evaluar los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima, 2022. Se realizó un diseño experimental factorial completo (2^2) para evaluar los efectos del tipo de cultivo (Vetiver y Junco) y el tipo de sustrato (zeolita y grava). El experimento se llevó a cabo en humedales tipo lotes con monitoreos de 4 semanas. Los resultados mostraron que el % de reducción máxima del DQO fue de 83,67% con el tratamiento de Zeolita y Junco, el pH se mantuvo entre 6,76 y 8,64. El resultado mínimo de la conductividad fue de 2,70 mS/cm y la Turbidez de 6,76 NTU en el tratamiento con Vetiver mientras que los Coliformes Termotolerantes arrojaron valores de 9,20 NMP/L y Coliformes Totales de 170 NMP/L con el tratamiento de grava con un 99% de remoción. Los indicadores como el tipo de planta tienen un efecto significativo en la DQO mientras que el tipo de sustrato tienen un efecto significativo en la conductividad y turbidez.

Los usos de los humedales artificiales con sustratos son necesarios para el tratamiento de agua residual ácida y agua residual urbana, generando así una estabilización fisicoquímica y el agua tratada para un reúso.

Palabras clave: Humedal artificial; zeolita; vetiver; tratamiento de agua

ABSTRACT

This research sought to evaluate the operation components of a subsurface artificial wetland in the treatment of wastewater in the district of Independencia, Lima, 2022. A full (2^2) factorial experimental design was carried out to evaluate the effects of the type of crop (Vetiver and Rush) and the type of substrate (zeolite and gravel). The experiment was carried out in batch-type wetlands with 4-week monitoring. The results showed the % of maximum COD reduction was 83,67% for the Zeolite and Rush treatment, the pH was maintained between 6,76 and 8,64. The minimum conductivity result was 2,70 mS/cm, turbidity of 6,76 NTU in treatment with Vetiver while thermotolerant coliforms 9,20 NMP/L and total coliforms 170 NMP/L with gravel treatment with 99% removal. Indicators such as the type of plant have a significant effect on COD while the type of substrate has a significant effect on conductivity and turbidity.

The uses of wetlands with substrates are necessary for the treatment of acid wastewater and urban wastewater, generating a physicochemical stabilization and the treated water for reuse.

Keywords: Constructed wetland; zeolite; vetiver; water treatment

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más abundante del planeta y al mismo tiempo el más esencial para el desarrollo de la vida, siendo empleada en todas las actividades humanas, que al ser utilizada es un obstáculo para ser eliminada, pero en la actualidad su disponibilidad está agotándose por motivo de la contaminación severa, especialmente en actividades industriales y domésticas poseyendo una alta carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos. (Hernández Vásquez, 2017).

A nivel mundial se ha fomentado el desarrollo de proyectos e investigaciones para diseñar tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales con menores costos de operación, energía y explotación. Una de las innovaciones desarrolladas en los últimos años han sido los humedales artificiales, los cuales imitan las características y la capacidad de reciclaje de los pantanos naturales, convirtiéndose así en un medio eficiente para la absorción y filtración de contaminantes presentes en las aguas residuales (García, 2021)

En la presente investigación se evaluó los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial para la remoción de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua residual, para ello se estudió la interacción del tipo de cultivo de macrófitas respecto al tipo de sustrato. Para realizar nuestro objetivo se siguió una serie de etapas, iniciando con la caracterización del agua residual y la definición del humedal artificial para luego evaluar la interacción entre sus componentes del humedal, se empleó un diseño factorial mixto en función del estadístico ANOVA, donde se usó el software MINITAB Versión 22 para el procesamiento y análisis de datos.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Las actividades que desarrolla el ser humano en su mayoría utilizan agua, generando así aguas residuales. A medida que aumenta la demanda mundial del agua, también lo hace la cantidad total de aguas contaminadas generadas y la carga de contaminación que conlleva. En todos los países, salvo en los más desarrollados, la mayor cantidad de las aguas residuales se derrama directamente en el medio ambiente sin tratamiento adecuado, lo que perjudica la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos naturales de agua dulce y los ecosistemas (Ryder, n.d., 2017).

Los humedales artificiales, se presentan como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, principalmente en los casos donde resulta difícil construir, operar o mantener adecuadamente los sistemas de tratamiento convencionales (Díaz Acero, 2014). Esta técnica natural de remoción de contaminantes del agua residual ha demostrado ser una excelente opción para su uso en pequeñas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (PTAR). Por eso que la mayoría de las ciudades pequeñas de Europa han optado por construirlos, debido a su aspecto natural, su uso mínimo o nulo de energía, su fácil funcionamiento y sus bajos costos de mantenimiento (Delgadillo, 2010).

Uno de los problemas medioambientales más visibles en la sociedad actual es la contaminación de aguas, generadas por los hogares, conocidas como aguas domésticas, ya que estas son dispuestas inadecuadamente, lo que da lugar a una alta incidencia de contaminación de los cuerpos receptores de aguas naturales, provocando muchas veces la formación de vectores infecciosos. Por tal motivo es necesario su tratamiento, ya que es un recurso escaso en lugares de bajas condiciones económicas que no cuentan con la calidad y cantidad necesaria de agua para poder utilizar este recurso de diferentes maneras (Torres Callupe, 2018). Según el primer estudio de desempeño ambiental realizado por el Perú, se señala que solo el 40 % del volumen total producido recibe algún tipo de tratamiento adecuado para luego

ser descargado a un cuerpo receptor. En virtud de ello, las principales causas de la deficiente calidad de los cuerpos de agua son el insuficiente tratamiento de y las descargas de aguas residuales no tratadas (Paucar & Iturregui, 2020).

Por otra parte, la disposición final de las aguas residuales generadas por las diversas actividades humanas (principalmente usos domésticos e industriales) representa un problema que está en constante incremento y se agrava en las grandes ciudades (Delgadillo, 2010). Según la UNESCO (2003) en el 2025, el hombre consumirá el 70% del agua disponible, esta estimación se ha realizado considerando únicamente el crecimiento demográfico.

Dada a esta problemática, se planteó nuevas alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo y de fácil operación y mantenimiento, es decir que sean acordes a nuestra necesidad y realidad. Por ello se eligió el distrito de Independencia ya que actualmente es uno de los distritos con mayor crecimiento poblacional lo que ocasiona mayor contaminación del agua. Este estudio busca potenciar a los humedales artificiales subsuperficiales como una alternativa de tratamiento del agua residual para su reutilización en el riego de áreas verdes ya que representa un método viable ambiental, económica y social.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿De qué manera evaluamos los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué medida el tipo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial generará el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima?
- ¿De qué medida el efecto del tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial generará un tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar las componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del tipo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.
- Determinar el efecto del tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.

1.4. Limitantes de la investigación

Teórica

La presente investigación tuvo como limitación teórica la poca información sobre el uso de la zeolita como medio de sustrato en el tratamiento de las aguas residuales mediante los humedales artificiales, asimismo, no se ha encontrado investigaciones nacionales que aporten significativamente a la presente investigación, en su mayoría se limitan al estudio de reducción de materia orgánica mas no de parámetros fisicoquímicos.

Temporal

La limitación temporal fue la poca disponibilidad horaria del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao, ya que no existe un horario más flexible para los tesisistas, otra, limitante es que debido a la duración del curso taller de tesis no fue posible realizar más mediciones de los indicadores del agua residual en los humedales artificiales subsuperficial tal como se propuso inicialmente en el proyecto de investigación.

Espacial

La limitante espacial es que la PTAR de la municipalidad de Independencia se encuentra ubicado en una zona de poca accesibilidad, lo que resulta un problema al realizar la toma de muestra de las aguas residuales, por otro lado, el contexto de la COVID-19 no favoreció el transporte de las aguas residuales desde la PTAR de la municipalidad de Independencia hasta el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales (FIARN) de la Universidad Nacional del Callao, dado que el desarrollo experimental se realizó en un área acondicionada del laboratorio de la FIARN.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La importancia de presentar trabajos previos es que ayuda a comprender la razón por la que se realizó la investigación puesto que permite tener indicadores de confiabilidad y validez con estudios nuevos; tomando en cuenta a las variables, dimensiones o indicadores del estudio.

2.1.1. A nivel Internacional

Parrao, (2018) en su trabajo de investigación titulado *“Diseño y Construcción de un Prototipo de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de aguas Residuales Domésticas”* tuvo como objetivo determinar la capacidad de remoción de contaminantes de aguas residuales negras, mediante el tratamiento de humedales artificiales a nivel domiciliario. Los resultados obtenidos a través de los análisis fisicoquímicos de las aguas, demostró que, en un periodo de tres años, una vez estabilizado el sistema, se produce del orden de 77% a 94% de remoción de los componentes de aguas servidas, tales como: Demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, fósforos, grasas y aceites, y coliformes totales. Esta investigación nos demuestra la eficiencia con lo que los humedales artificiales pueden tratar aguas residuales de manera natural, sin el uso de la energía, y junto a ello, reutilizándola principalmente en riego.

Aguilar (2020) en su trabajo de investigación titulado *“Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Internacional SEK”*, tuvieron como objetivo la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial para tratar las aguas residuales que genera la Universidad Internacional SEK (Campus Miguel de Cervantes). Para ello se diseñó un humedal artificial con macrófitas ornamentales: cartucho (*Zantedeschia*), achira (*Canna spp*) y lirio (*Iris spp*) y como sustrato se usó la grava. En este trabajo de investigación se estimó que el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial permitió disminuir un 86 % para

DBO₅, 80-90 % para DQO, 90-95% para sólidos en suspensión, 78.8% para coliformes fecales y 80 % para nitrógeno y fósforo total.

Mena (2014) en su investigación, titulado *“Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Municipio de Pasto, Colombia”*, tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales Artificiales de flujo subsuperficial horizontal en el Colegio Comfamiliar Siglo XXI. Para el desarrollo del estudio se diseñó e implemento una trampa de grasas, un tanque séptico, un filtro anaerobio de flujo ascendente, seguido del humedal artificial, donde se llevó a cabo la evaluación del sistema mediante la medición y análisis de algunos indicadores de calidad del agua como DBO₅, DQO, Sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total, grasas y aceites, Coliformes Totales y Escherichia Coli. Los valores de eficiencia de remoción obtenidos para DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, coliformes totales y Escherichia Coli, indican que de acuerdo a los límites exigidos por la norma para el control de los vertimientos en Colombia (Decreto 1594 de 1984), cumplen con lo estipulado, presentando valores de remoción mayores al 80% en cada parámetro. Se eligió esta investigación debido a que contiene las variables con las cuales vamos a trabajar y el tipo de humedal desarrollado es de Flujo subsuperficial, el cual es el que desarrollaremos en nuestra investigación, por lo que es importante usarlo como referencia.

Moreno & Rangel (2018) en su proyecto de investigación titulado *“Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal prototipo plantado con sistema vetiver para el tratamiento de aguas residuales en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca”*, tuvieron como objetivo evaluar la remoción de materia orgánica, en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal plantado con vetiver durante su etapa inicial para el tratamiento de agua residual en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca. De acuerdo al proyecto se pudo demostrar que, a medida en que la planta Vetiver absorbe los

contaminantes presentes en el agua residual como nutrientes para sus funciones vitales y en el cálculo del porcentaje de remoción de materia orgánica, el humedal artificial 1, presentó mejores resultados de porcentajes de remoción tanto para la variable DBO₅ como DQO, con valores en reducciones de 86 % y 82%, respectivamente, con tiempo de retención de 3 días, además, con crecimientos y desarrollo de planta superiores en comparación con los humedales 2 y 3, estableciéndose como el más indicado en cuanto a dimensiones y funcionamiento para la aplicación de procesos de fitorremediación.

Santana & Santos (2016) en su estudio de investigación titulado "*Eficiencia del pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) ex_situ en la remoción de contaminantes orgánicos caso de estudio río muerto, cantón Manta*", tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ex - situ en la remoción de los contaminantes orgánicos en las aguas del río Muerto del cantón Manta, para lo cual utilizaron un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos utilizando 30, 12 y 2 esquejes del pasto vetiver bajo condiciones hidropónicas y un testigo, en un volumen de 20 litros de agua del río Muerto, cada uno con tres repeticiones. Realizaron el monitoreo cada ocho días el oxígeno disuelto, pH y salinidad seguidamente también la remoción de nitrógeno, fósforo, turbidez y DBO, el experimento duró cuatro semanas. Los resultados, verificaron con el diagnóstico de las aguas del río Muerto que tiene una alta concentración de materia orgánica e inorgánica DQO (1975 mg/L), originando un bajo nivel de oxígeno disuelto de 0,51 mg/L. frente al testigo para remoción DBO a los 15 días, con una significación de $P=0.016$ y $P=0.037$, respectivamente. Los esquejes del pasto vetiver utilizados en el experimento removieron contaminantes y aumentaron el oxígeno disuelto en todas las unidades experimentales desde la primera semana reflejando su adaptabilidad y desarrollo al transcurrir los días; tanto el tratamiento A2 (2 esquejes + 20 L), y A3 (12 esquejes + 20 L), mostraron diferencias estadísticamente significativas. Así mismo, para turbidez se encontraron diferencias significativas a los 8 días: A2 ($P=0.004$) y A3 ($P=0.014$). Sin embargo, el tercer tratamiento, A3 resultó muy eficiente en la remoción final de: DBO (72.92%), nitrógeno (84.09%), fósforo

(65.04%) y turbidez (76.76%), y se observó un aumento del nivel de OD a 5.04 mg/L. La relevancia de esta investigación es demostrar la eficiencia del vetiver en la remoción final de los indicadores DBQ, Nitrógeno Fosforo, turbidez, y oxígeno disuelto. Por lo que me permitió utilizar el número de esquejes de vetiver en el humedal artificial, considere el tiempo de remoción para los indicadores establecidos.

2.1.2. A nivel Nacional

Guillermo & Luis (2018) en su investigación titulado, *“Implementación De Humedal Artificial En El Tratamiento De Agua Residual Doméstica Del Proyecto Don Javier 79, Yarabamba – Arequipa”* tiene como objetivo implementar el humedal artificial para el tratamiento de Agua Residual Doméstica del campamento Don Javier. El tipo de investigación es de tipo explicativo correlacional ya que analiza la relación entre las variables de estudio y los diferentes factores que originan el problema en estudio y la influencia de estos. El método de la presente investigación es cuantitativo puesto que se va a medir la variable dependiente a través de instrumentos confiables, válidos y objetivos; para conocer la eficiencia del humedal artificial en el tratamiento de agua residual doméstica. Después de Implementar el humedal artificial para el tratamiento de ARD del campamento Don Javier 79, luego de 7 meses de evaluación, se concluye que el humedal artificial ha mejorado significativamente el sistema de tratamiento de ARD cuya eficiencia se demuestra en la reducción del nivel de los contaminantes. La DBO₅ experimentó una reducción hasta 98.3%, DQO 82.8%, Grasas y Aceites 80.8%, SST 89.0%, y Coliformes Termotolerantes 99.0%; permitiendo que el efluente no exceda los LMP de la R.D. N° 003-2010-MINAM.

Cantoral (2015) *“Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguíta Cyperus alternifolius en humedales artificiales, urbanización Zárate – San Juan de Lurigancho”, Lima.* El objetivo fue determinar el porcentaje de remoción de los contaminantes en el humedal artificial con la especie vegetal mencionada. El agua usada para el tratamiento en estos humedales fue tomada de la red de alcantarillado de una vivienda unifamiliar ubicada en la urbanización de Zárate del distrito de San Juan de

Lurigancho – Lima. El monitoreo y el análisis de los parámetros de tratamiento de aguas se realizó de acuerdo al protocolo difundido por el ministerio de vivienda y construcción D.S. 003 – 2010, teniéndose en cuenta a los parámetros de Turbidez, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Los resultados obtenidos en torno a estos parámetros fueron lo siguiente: 97,66% (turbiedad), 79,68%(SST), 72,84 % (DBO₅) y 76,85%(DQO) de nivel de remoción. Esta investigación hace referencia que mediante el sistema de humedal artificial con la especie paraguaitas *Cyperus alternifolius*, es posible disminuir el porcentaje de contaminantes de las aguas residuales. Contribuyó a mi investigación, porque considere como referencia las técnicas e instrumentos para la recolección de datos y para el procesamiento respectivo.

Cejas, (2021a) en su trabajo de investigación titulado *“Implementación piloto de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en la Universidad Nacional de Moquegua, para el tratamiento del agua residual de la laguna primaria de la planta de tratamiento de agua residual - PTAR del Distrito de Pacocha, Ilo 2017”* para optar el título de Ingeniero Ambiental en la Universidad Nacional de Moquegua localizado en Lima, Perú, tuvo como objetivo implementar un humedal artificial piloto de flujo subsuperficial horizontal en la Universidad Nacional de Moquegua para el tratamiento adecuado del agua residual de la laguna primaria de la PTAR de la EPS Ilo. Se diseñó un piloto de humedal artificial utilizando una especie que se encuentra en las riberas del Rio Osmore como es el Carrizo (*Phragmites australis* Caw). Se aplicó una metodología cuantitativa y la utilización de un diseño de investigación cuasiexperimental analizando la causa y efecto, donde la población en estudio está compuesta por el afluente de la laguna primaria de la planta de tratamiento de aguas residuales de la EPS Ilo y la muestra que se ha utilizado es de un volumen de 200 litros de afluente tomado a la salida de la laguna primaria PETAR de la EPS Ilo para cada humedal. Se utilizaron equipos como el multiparámetro (pH, Oxígeno, salinidad y sólidos suspendidos totales) y termómetro digital (T °C). Se logró reducir significativamente el DBO₅ en el Humedal Artificial Convencional de 254 mg/l a 52 mg/l que es el 80% de remoción encontrándose

por debajo del LMP establecido y también se demuestra que la utilización de la zeolita es un material importante en la construcción del humedal puesto que al realizar la comparación de los dos humedales reflejan que tiene una mayor eficiencia el humedal artificial mejorado. La investigación preliminar es importante ya que permite comprobar la eficiencia de la implementación de un humedal artificial, a efectos de poder reducir el nivel de contaminantes presentes en una PTAR.

Rojas (2018) en su trabajo de investigación tiene como título: *“Tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie vetiver (Chrysopogon zizanioides) en humedales artificiales en la comunidad de Santa Rosa Bajo, distrito de Chota”*, Cajamarca tiene como objetivo de estudio realizar el tratamiento de las aguas residuales domésticas con la especie vetiver (Chrysopogon zizanioides) en humedales artificiales en la comunidad de Santa Rosa Bajo –Chota, por lo que se consideró la hipótesis. El diseño de investigación fue Pre Experimental por la relación de sus variables y diseño de preprueba – posprueba. La muestra de estudio fue 50 Litros de agua residual generada en la comunidad. Los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de remoción de estos parámetros fueron los siguientes: 99,53% (turbidez), 95,51%(SST), 83,89% (DBO₅), 72,97% (DQO), 88.89%, (Aceites y grasas), 99.99% (Coliformes Termotolerantes) ,47% (pH) y con una temperatura promedio de 22°C, por lo que, al comparar estos resultados con los Límites Máximos Permisibles de efluentes para vertidos a cuerpos de agua, los valores están por debajo de los establecidos. Concluyendo que el sistema humedal artificial con la especie vetiver (Chrysopogon zizanioides) es eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La importancia en la investigación radica en demostrar la eficiencia del vetiver en la remoción final de contaminantes por lo que al comparar los resultados de los análisis físicos, químicos y microbiológicos del efluente con los Límites Máximos Permisibles los valores de los parámetros medidos si cumple la normatividad del D.S. N° 003-2010-MINAM.

Baca, (2012) La presente Tesis, titulada: “*Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona*”, tiene como objetivo demostrar que es viable utilizar métodos que imiten la capacidad de la naturaleza, (humedales), para depurar efluentes domésticos, frente a métodos que utilizan altas tecnologías, para ello se tuvo que construir un Humedal piloto, el mismo que previamente fue validado para utilizarse en las pruebas experimentales, esta unidad se construyó y operó en las instalaciones de la Universidad Nacional del Callao, utilizándose los efluentes generados en la ciudad universitaria, en razón, de que por sus características estos son similares a los domésticos. La importancia de la tesis es que su aplicación para resolver problemas similares en ciudades carentes de sistemas de tratamiento de efluentes y que una vez tratadas las podamos reutilizar en el riego de áreas verdes, evitando a cambio utilizar como medio de disposición final un curso natural de agua y la contaminación del mismo.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Marco legal y normativo

El marco normativo está establecido por las autoridades expertas en el tema.

Constitución Política del Perú

El artículo 67° indica que el estado determina la política nacional del ambiente y fomenta el uso de los recursos naturales de forma sostenible.

El artículo 66° señala que los recursos naturales, tanto los renovables como los no renovables, son patrimonio de la nación, su uso está bajo el control del estado.

Ley General de Aguas – D.S. N° 17752

El Artículo 22°, prohíbe el vertido o la emisión de cualquier residuo, sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar los cursos de agua, causando daños o poniendo en peligro la salud humana o el desarrollo de la flora o fauna, comprometiendo su uso por otros motivos.

Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, D.L. N° 613

El artículo 14° del capítulo IV establece que está prohibido el vertido de sustancias contaminantes que degraden los ecosistemas o modifiquen la calidad del ambiente, sin adoptar procedimientos de depuración; la autoridad competente se encargará de establecer las medidas de control y muestreo para garantizar el cumplimiento de esta norma.

El artículo 15°, del mismo capítulo, especifica que es ilegal el vertido de residuos sólidos, efluentes líquidos o gaseosos u otro tipo de sustancias que alteren el agua en una proporción que haga perjudicial su uso y que la autoridad competente debe realizar un control frecuente del agua para garantizar el cumplimiento de esta norma.

Ley General del Ambiente, Ley N° 28611

El artículo 74°, indica que todo titular de operaciones es responsable de las emisiones, efluentes, descargas y otros impactos negativos sobre el medio ambiente, la salud y los recursos naturales, como consecuencia de sus actividades. En esta responsabilidad se incluyen los riesgos ambientales y los daños causados por acción u omisión.

Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, D.S. N° 273-2013-VIVIENDA

La presente resolución establece procedimientos y metodologías que deben cumplirse en el desarrollo del monitoreo de la calidad del agua residual tratada de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, D.S. N° 003-2010-MINAM

Se aprueban los Límites Máximos Permisibles para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales a fin de controlar

los altos niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en los efluentes.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetros	Und.	LMP
Temperatura	°C	< 35
pH	Unidad pH	6.5 – 8.5
Demanda Química de Oxígeno	Mg/L	200
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000

Nota. Elaboración a partir del D.S. N° 003-2010-MINAM

Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, D.S. N° 004-2017-MINAM

Se establecen los niveles de concentración de los, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el agua que no representan riesgo significativo.

Tabla 2

ECA para Agua, categoría 3, D1 (C) Riego de vegetales

Parámetros	Unidad	Valores
Temperatura	°C	Δ 3
Conductividad	μS/cm	2,500
pH	unidad	6.5 - 8.5
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,000

Nota. Elaboración a partir del D.S. N° 004-2017-MINAM

2.2.2. Enfoque en las ciencias ambientales

Las condiciones de operación del humedal artificial subsuperficial integra diferentes disciplinas, entre las que destacan las ciencias naturales (biología,

geología, física y química) con las ciencias sociales (economía, ingeniería, etc.) (Medio & Teoría, 1972), por ello es importante unificar los conocimientos de todas estas disciplinas ya que estos interactúan entre ellos.

El enfoque holístico estudia tanto a los elementos como sus interrelaciones. La teoría de sistemas se utiliza para investigar el entorno de la forma holística mediante un proceso conocido como dinámica de sistemas, que se basa en observar y analizar los vínculos e interacciones entre las partes del objeto de nuestra investigación (Medio & Teoría, 1972).

2.2.3. Humedal artificial

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en hacer crecer un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un sustrato impermeabilizado, la acción de las macrófitas permite una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual es depurada de forma gradual y lenta (Muñoz et al., 1995).

La sedimentación, la degradación microbiana, la acción de las plantas, la absorción, las reacciones químicas y volatilización son métodos que los humedales utilizan para eliminar los contaminantes.

2.2.3.1. Beneficio de los humedales artificiales. Los beneficios que surgen de los humedales construidos incluyen la capacidad de tratamiento, la provisión de vida silvestre y diversidad de hábitat, la capacidad para actividades recreativas (por ejemplo, observación de aves), almacenamiento de agua y mejora estética del entorno circundante (Knight et al., 2001). Por lo tanto, los humedales naturales como los construidos tienen funciones ecológicas similares, aunque los humedales construidos podrían caracterizarse como un ambiente con más impedimentos ecológicos.

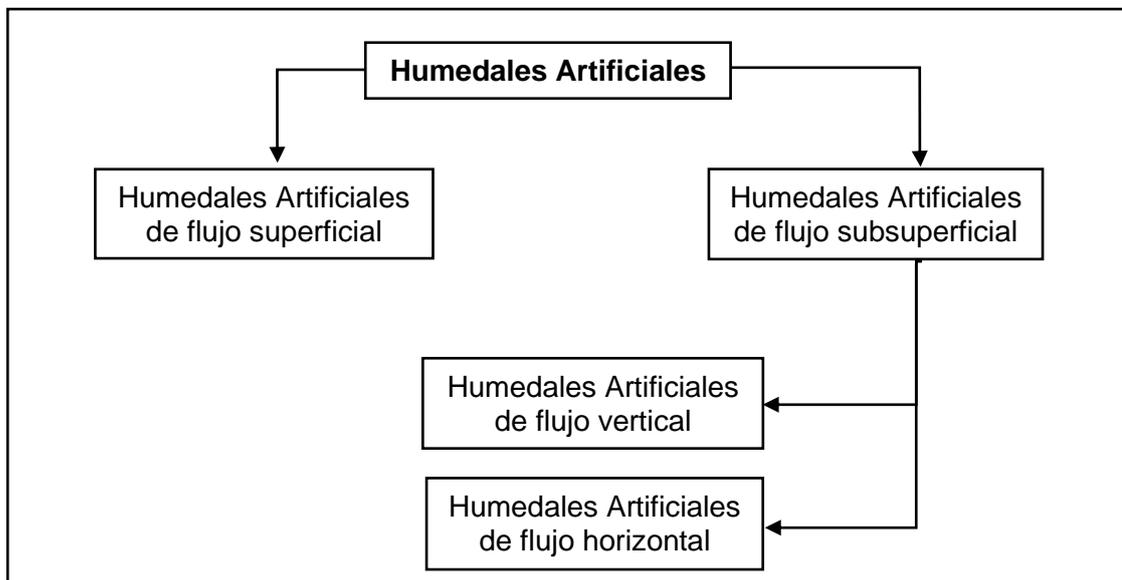
Ghermandi et al., (2010) investigó los valores comparativos de 186 sitios de humedales naturales y construidos en todo el mundo e informó que los humedales construidos poseen un valor más alto en comparación con otros tipos

de humedales, especialmente en lo que respecta al control de inundaciones y aguas pluviales y la mejora de la calidad del agua, al tiempo que brindan la posibilidad de restaurar y mejorar la biodiversidad local, por ejemplo, en áreas urbanizadas modernas (Stefanakis et al., 2014b).

2.2.3.2. Clasificación de los humedales artificiales. Los humedales artificiales pueden ser de dos tipos, de acuerdo con la circulación del agua que se emplee.

Figura 1

Clasificación de los humedales artificiales



i. Humedales artificiales de flujo superficial. Son aquellos donde el agua circula a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmosfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales.

Este sistema es muy recomendable desde el punto de vista paisajístico por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves y otros tipos de animales. Debido a las complejas interacciones biológicas que se desarrollan pueden convertirse en atracciones turísticas así como en lugares de investigación para varias disciplinas (Delgadillo, 2010).

ii. Humedales artificiales de flujo subsuperficial. Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como subsurface flow constructed wetlands), se caracterizan por que la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 60 cm. La vegetación se planta en el sustrato y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos:

- **Humedales subsuperficiales de flujo vertical**

Este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías. Las aguas infiltran verticalmente, a través de un sustrato inerte y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación del agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias (Delgadillo, 2010).

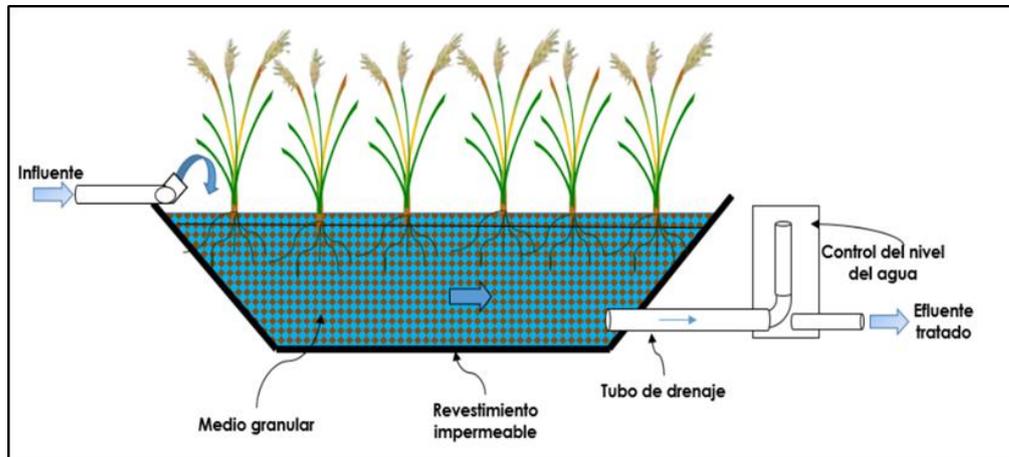
- **Humedales subsuperficiales de flujo horizontal**

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitos acuáticos, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Brix en Kolb, 1998). El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (Delgadillo, 2010). Ver Figura 2.

2.2.3.3. Componentes de los humedales artificiales. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos (Delgadillo, 2010).

Figura 2

Humedal artificial subsuperficial horizontal



Nota. Extraído de Naranjo Ríos, (2017)

i. Agua residual: Según Díaz-Cuenca et al., (2012) las aguas residuales son aquellas que como resultado de las acciones y efectos de las personas, arrojan sustancias o residuos contaminantes al agua alterando sus propiedades; este tipo de aguas provoca afectaciones en su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica.

ii. Microorganismos: Se encargan de efectuar el tratamiento biológico. Las colonias de microorganismos aeróbicas se forman en la zona superior del humedal donde prevalece el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, mientras que los microorganismos anaerobios predominan en el resto del lecho granular.

Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes, elementos traza y la desinfección (Vinuesa Estévez, 2014).

iii. Sustrato (medio granular): Es el medio granular que se utiliza como relleno en la construcción del humedal artificial con el fin de sostener las plantas que se utilizaran para la remoción de los contaminantes, además de servir como medio para la filtración y sedimentación de las partículas en el agua (Parrao López, 2018).

La hidráulica del humedal y, por tanto, los caudales del agua tratada se ven directamente afectados por el tamaño del sustrato. Si el lecho granular está constituido por un material de diámetro pequeño, mayor será la capacidad de adsorción debido a la superficie expuesta; por el contrario, si el diámetro del material granular aumenta, la eficacia disminuye debido a la pérdida del área expuesta, aunque el volumen efectivo aumente.

Para el desarrollo de esta investigación se empleó dos tipos de sustrato, los cuales se definen a continuación:

- **Zeolita:** Son minerales cristalinos de aluminosilicatos con una estructura microporosa, suele denominarse “tamices moleculares” y tienen diversas aplicaciones industriales (Bruch et al., 2011)

Se ha demostrado que las zeolitas estimulan eficazmente el crecimiento de los microorganismos. Su elevada superficie y su textura superficial proporcionan el medio ideal para la adhesión de las bacterias y el desarrollo de las biopelículas.

Tabla 3

Especificaciones generales del sustrato zeolita

IDENTIFICACION DEL SUSTRATO	
Nombre	Zeolita Natural
Granulometría empleada	¼ diámetro
Aplicaciones	 <p>Productos e insumos agrícolas, tratamiento de suelos, medios de cultivo, sustratos, construcción, medio de absorción para control de olores , absorbente industrial, aguas recicladas, tratamiento de aguas domesticas e industriales, eliminación de metales pesados, etc. (Henry Pinilla, 2015)</p>

- **Grava:** Son aquellas rocas clásticas cuyos componentes detríticos están sueltos o ligeramente cementados; en el caso de hallarse cementado se

les llama areniscas. La denominación de arena o grava depende de la dimensión mayor de los granos que las componen, siendo los límites muy variables según la opinión de los distintos autores (Claudio Coello, 1975, pág. 1).

La capacidad de absorción y el poder de filtración del medio se reducen cuando el lecho granular está formado por gravas y arenas, mientras que la conductividad hidráulica mejora.

Tabla 4

Especificaciones generales del sustrato grava

IDENTIFICACION DEL SUSTRATO	
Nombre	Grava
Granulometría empleada	¼ diámetro
Aplicaciones	Es una importante materia prima para la construcción que se utiliza como agregado en la producción del hormigón, también se utiliza en cubiertas planas no transitables como lastre y revestimiento protector, así como en soleras y desagües como filtro.
	

iv. Vegetación: Las macrófitas que se desarrollan en los humedales artificiales son una parte importante del diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales ya que tienen excelentes propiedades con relación a los procesos de remoción. Uno de los más importantes efectos tiene que ver con los efectos físicos que las plantas ocasionan, como efecto de filtración, control de erosión y área superficial para el crecimiento bacterial (Paredes y Kuschik, 2001).

El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Fernández & Miguel, 2004).

- **Junco (Juncus spp):** Son especies parecidas a la hierba (sin hojas) que poseen un rizoma largo y pueden crecer hasta 1,5 m. Estas especies

son capaces de crecer en lugares húmedos ricos en humus y pueden propagarse por división de rizomas o por semillas (Varjani et al., 2020).

Tabla 5

Clasificación científica del juncus spp

	Nombre científico	Juncus spp.
	División	Magnoliophyta
	Clase	Liliopsida
	Orden	Poales
	Familia	Juncaceae
	Genero	Juncus
	Especie	spp

- Vetiver (Chrysopogon zizanioides):** Se distingue por presentar características que permite ser empleado en el tratamiento de aguas residuales como: Alta tolerancia a la acidez, alcalinidad, tolerancia en condiciones de humedal, tolerancia a metales pesados, desarrollo y resistencia radicular, alta absorción de nitrógeno y fosforo y descomposición de herbicidas y pesticidas (Alegre, 2007).

Tabla 6

Clasificación científica de la Chrysopogon zizanioides

	Nombre científico	Chrysopogon zizanioides
	Nombre vulgar	Vetiver Grass
	División	Magnoliophyta
	Clase	Liliopsida
	Orden	Poales
	Familia	Poaceae (Gramineae)
	Genero	Chrysopogon
	Especie	Chrysopogon zizanioides

Nota. Tomado de Callirgos Rodríguez, C. M. (2014).

2.2.3.4. Funcionamiento del humedal artificial. Se fundamentan en tres principios básicos: La actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante (Delgadillo, 2010).

2.2.4. Tratamiento de aguas residuales

Son procesos combinados donde se utiliza los parámetros físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales. En general estos procesos físicos se encargan de eliminar componentes o sustancias peligrosas exponiéndose de forma natural (Ryder, 2017).

El sistema de tratamiento de tratamiento se puede dividir en las siguientes etapas:

i. Pretratamiento: Es la eliminación de los sólidos gruesos y otros materiales grandes que suelen encontrarse en las aguas residuales. Estos sólidos consisten en trozos de madera, tela, papel, plástico, etc., junco con alguna materia fecal. Se eliminan los sólidos inorgánicos pesados como arena y grava (Sonune & Ghate, 2004).

ii. Tratamiento primario: Se realizan los sólidos orgánicos e inorgánicos mediante procesos físicos de sedimentación y flotación. También se eliminan parte del nitrógeno orgánico, fosforo orgánico y metales pesados asociados a los sólidos (Sonune & Ghate, 2004).

iii. Tratamiento secundario: El Ministerio del Ambiente “MAE,” 2013 define como la inclusión de procesos biológicos en los que predominan las reacciones bioquímicas, generadas por microorganismos que logran resultados eficientes.

Los sistemas más empleados son:

- Biofiltros o filtración biológica, filtros percoladores, filtros rotatorios o biodiscos.

- Lodos activados, entre los que se encuentran los convencionales y los de aireación extendida.
- Lagunas de estabilización de los tipos facultativas y aireadas.

iv. Tratamiento terciario: Incluye la eliminación de la carga orgánica remanente en el tratamiento secundario, la eliminación de microorganismos patógenos, la eliminación de colores, olores indeseables y la eliminación de detergentes residuales que provocan espuma y la eutrofización (Cejas Barja, 2021)

2.2.5. Aguas residuales

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

2.2.5.1. Clasificación de las aguas residuales

i. Aguas residuales industriales: Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, entre otros (OEFA, 2014).

ii. Aguas residuales domésticas: Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, procedentes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (OEFA, 2014).

iii. Aguas residuales municipales: Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar combinadas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas (OEFA, 2014).

2.2.5.2. Contaminantes del agua residual. Los principales contaminantes del agua residual se determinan de acuerdo a sus parámetros físicos, químicos y biológicos.

Tabla 7

Factores que determinan la contaminación del agua

Factores	Naturaleza
Físicos	Color, olor, turbidez, sabor, temperatura y conductividad eléctrica
Químicos	Carbonatos, pH, sulfatos, cloruros, fluoruros, nitratos e iones metálicos que constituyen el total de sólidos disueltos.
Biológicos	Bacterias, hongos, algas, protozoos y virus.

Nota. Extraído de (Saravanane & Murthy, 2000)

i. Parámetros físicos: Entre los parámetros físicos medibles tenemos: Temperatura, olores, conductividad eléctrica y turbidez.

- **Conductividad.** Es la capacidad del agua para generar energía. Dado que los iones en solución transportan la corriente eléctrica, por lo tanto, el aumento de la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad (Crites et al., 2000).
- **Turbidez.** Se define como una medida de la pérdida de su transparencia, ocasionada por el material particulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua (Cárdenas, 2005).

ii. Parámetros Químicos: Los parámetros químicos que se emplean para definir las aguas residuales son compuestos orgánicos e Inorgánicos.

Existen tres métodos principales para cuantificar la cantidad de materia orgánica: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (COT). Los métodos se basan en la determinación de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar determinados porcentajes de materia orgánica (Delgadillo, 2010)

- **Potencial de hidrogeno (pH):** La medición del pH muestra si una solución es acida o alcalina. Si la solución tiene la misma concentración de iones hidrogeno e iones hidroxilo, el pH se considera neutro. La escala de pH es logarítmica y va de 0,0 a 14,0 siendo 7,0 neutro (Li & Liu, 2019)

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual. Se expresa comúnmente en masa de oxígeno consumido sobre el volumen de solución (Li & Liu, 2019).

iii. **Parámetros Biológicos**

- **Coliformes Totales:** Son bacterias aerobias y anaerobias facultativas no esporulados. La temperatura, la materia orgánica, el pH y la humedad son circunstancias favorables para que estos bacilos proliferen fuera de los intestinos de los animales homeotérmicos (Mendonca, 2000).

- **Coliformes Termotolerantes:** Constituyen un subgrupo de los coliformes totales, son de tipo bastoncitos, se diferencian de los coliformes totales por ser tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44.5 °C) (Mendonca, 2000).

2.3. Marco conceptual

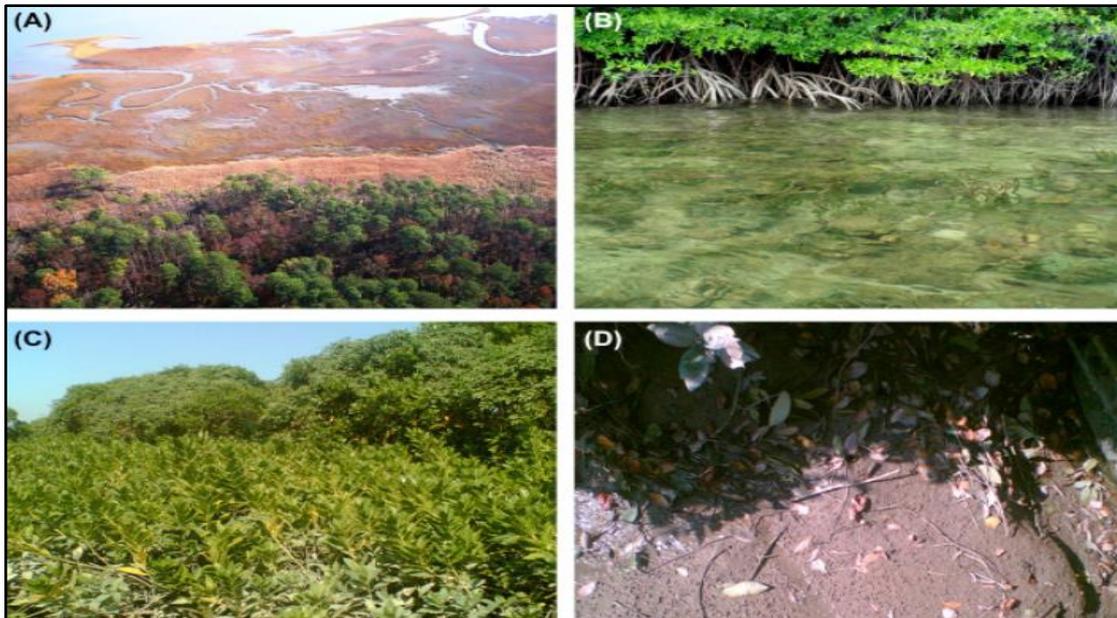
2.3.1. Humedales Naturales

Los humedales naturales son áreas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos, que integran características tanto de ambientes secos como húmedos. Pueden estar total o parcialmente cubiertos por agua durante períodos prolongados o durante todo el año. Son sistemas dinámicos que evolucionan continuamente y cambian sus características con el tiempo. El nivel de saturación de agua es un factor principal que determina la naturaleza del suelo y los tipos de especies de plantas y animales que viven en los humedales.

Las características de los humedales naturales se ven afectadas por una variedad de parámetros locales / regionales, que incluyen el clima, la hidrología, la topografía, la química del agua, la vegetación y la perturbación humana en la actualidad, entre otros. Debido a estas características y parámetros exactos que regulan su estado y apariencia, los humedales naturales se pueden encontrar en todos los continentes excepto en la Antártida (Stefanakis et al., 2014).

Figura 3

Humedales Naturales



Nota. Extraído de *Hopkinson et al., (2018)*

Los humedales naturales cumplen una serie de funciones múltiples, en función de su régimen hidrológico, es decir, la tasa de reciclaje del agua, el balance hídrico, etc. De estas funciones surgen diversos valores para la humanidad. Estos dos términos, funciones y valores, a menudo se confunden y se consideran idénticos (Barbier et al., 1997). Un buen conocimiento de las funciones de los humedales es importante a fin de determinar claramente sus valores para la humanidad y establecer el marco para su adecuada gestión. Los humedales generalmente ofrecen la siguiente función (MEA, 2005):

- Enriquecimiento de acuíferos subterráneos
- Absorción de dióxido de carbono
- Almacenamiento y liberación de calor
- Absorción de radiación solar y respectivo apoyo a las cadenas alimentarias.

2.3.2. Humedales Artificiales

En su mayoría son estanques poco profundos en los que se plantan especies de plantas acuáticas y la depuración se realiza mediante procesos

naturales de tipo microbiológico, físico y químico. Su diseño es muy variado, pero siempre incorporan canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar que los contaminantes lleguen a los ecosistemas circundantes y la gestión del flujo del efluentes en cuanto a su dirección, caudal, tiempo de retención y nivel del agua (Alarcón Herrera et al., 2018).

Asimismo, los humedales construidos son considerados como una tecnología eficiente para la eliminación de los microorganismos orgánicos mediante un proceso sinérgico, que incluye interacciones entre las plantas y los microorganismos como la hidrólisis, la volatilización, la sorción, la biodegradación y la fotólisis. Por ello, los humedales artificiales se caracterizan por ser una tecnología de tratamiento biológico de las aguas residuales de bajo coste que imita a los ecosistemas naturales de los humedales (Varjani et al., 2020).

El concepto básico de la construcción de sistemas de humedales artificiales (AAC) es replicar los diversos procesos de humedales de una manera más beneficiosa para los humanos y bajo condiciones ambientales controladas. Las funciones de especial interés son la protección contra inundaciones, el almacenamiento de agua y la mejora de la calidad del agua (Stefanakis et al., 2014).

Delgadillo (2010) ha permitido fundamentar la presente investigación dado que la mayoría de los conceptos teóricos citados para el desarrollo del humedal artificial subsuperficial se basa en sus aportes, conocimientos y experiencias, donde explica que la depuración de contaminantes del agua residual ocurre por la interacción entre los componentes del humedal (Vidal & Hormazábal, 2018).

2.3.3. Tratamiento de Aguas Residuales

La separación del líquido de los constituyentes no deseados es el principio básico en el tratamiento de las aguas residuales. El sistema de tratamiento emplea mecanismos físicos, químicos y biológicos para lograr este objetivo. El grado de contaminación de las aguas residuales y su origen determinan la complejidad del sistema de tratamiento (Baca Neglia, 2012)

Del mismo modo Carrión, (2008), indica que el tratamiento de aguas residuales consiste en un conjunto de procesos físicos químicos y biológicos, cuyo fin es producir agua limpia o reutilizable, mediante la remoción de contaminantes físicos, químicos y biológicos introducidos por el uso humano cotidiano del agua.

A lo largo del tiempo, el hombre ha buscado diversas formas de recuperar las aguas contaminadas con el fin de satisfacer sus necesidades. Por eso, el tratamiento de aguas residuales es una opción viable para reducir los contaminantes de forma sostenible y evitar graves consecuencias para el medio ambiente y la salud humana (Reynolds, 2002). El tratamiento de aguas contaminadas requiere una investigación exhaustiva basada en el caudal a tratar, el espacio disponible para la instalación de la planta de tratamiento, la viabilidad económica, el uso previsto del agua tratada, entre otros. En este caso, la solución más adecuada de tratamiento es la más eficiente, menos costosa y con más facilidades de instalación (Rossi et al., 2010).

Ryder, n.d. (2017) Permite fundamentar la definición del tratamiento de las aguas residuales desde un enfoque mundial, lo cual hace que esta investigación sea más real y confiable con las definiciones teóricas, ya que relaciona la agenda 2030 con el desarrollo sostenible.

2.3.4. Reutilización de las aguas residuales

La reutilización del agua tratada para el riego de vegetación tiene un doble objetivo: Por un lado, constituye un recurso complementario del agua y, por otro, el suelo se transforma en un reactor de purificación del agua.

El Health Services Survey Department en EE.UU., así como en Monterrey (México), señalan que la utilización de las aguas residuales para el riego de cultivos de plantas es saludable y aceptable, siempre y cuando se le dé el tratamiento adecuado antes de ser utilizado (Maximo Fidel Baca Neglia, 2012).

La reutilización de las aguas residuales debe considerar lo siguiente:

- Caracterización biológica y contenido de sólidos orgánicos e inorgánicos
- Problemática de la contaminación

- Técnicas de Control que garanticen la calidad adecuada
- Consideraciones socioeconómicas
- Técnicas de reutilización

2.4. Definición de términos básicos

- **Agua contaminada:** La Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua contaminada como aquella cuya "composición haya sido modificada de modo que no reúna las condiciones para el uso que se le hubiera destinado en su estado natural".
- **Coliformes:** Son bacterias con forma de bastoncillos, no forman esporas, y son Gram negativos aerobias y anaerobias facultativas, su característica principal es que fermenta la lactosa con formación de gases al cabo de 48 horas a una temperatura de 35° a 37°C, donde los Coliformes Fecales se diferencian de estas por ser termo tolerantes y resistentes a temperaturas de 44 °C a 46 °C (Moposita Chiluíza, 2015).
- **Fitodepuración:** Se define como un sistema de tratamiento de aguas residuales en la que se utilizan plantas acuáticas o llamadas macrófitas, para la reducción o eliminación de contaminantes que pueden estar presentes en ellas, mediante procesos biológicos, físicos y químicos (Vanegas Gómez, n.d.)
- **Humedal artificial:** son áreas de poca profundidad, construidos por el hombre, en la que se introducen plantas acuáticas, para el tratamiento de aguas residuales mediante procesos químicos, físicos y biológicos. Los humedales artificiales son un tipo de alternativa que requiere de poca energía para su funcionamiento y de bajo costo (Chafloque & Gómez, 2006).
- **Límites Máximos Permisibles:** Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente (Ministerio del Ambiente (MINAM), 2010)

- **Macrófitas:** Son plantas que crecen en ambientes acuáticos, se dividen en tres categorías: Emergentes, sumergidas y flotantes. Presentan menor densidad que el agua, por lo que consiguen flotar sin dificultad (Saavedra Castillo, 2017).
- **Oxígeno disuelto:** indican que el oxígeno disuelto es necesario para la vida acuática. La solubilidad de este gas oscila entre 7 mg/L a 35 °C y 14,6 mg/L a 0 °C. Una baja concentración de Oxígeno Disuelto disminuye su capacidad autopurificadora, volviéndose necesario el tratamiento de aguas residuales para su disposición final (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010).
- **Sustrato:** Es todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que sea diferente al suelo que, al ser depositado en un contenedor, solo o mezclado, cumple diferentes funciones como protección a las raíces de la planta, ejerciendo un papel de soporte para las plantas y su desarrollo (Eduardo, 2014).
- **Tratamiento de agua residual:** El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos cuyo objetivo es depurar contaminantes existentes en las aguas residuales (Manotupa Dueñas & Muriel Ortiz, n.d.).

III. HIPOTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

Los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial tienen un efecto significativo en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.

3.1.2. *Hipótesis Específicas*

- El tipo de cultivo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tiene un efecto significativo en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.
- El tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tiene un efecto significativo en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima.

3.2. Definición conceptual de las variables

- ***Variable independiente:***

Humedal artificial subsuperficial. Los humedales artificiales son sistema de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado (Delgadillo, 2010).

X = Humedal artificial subsuperficial

- ***Variable dependiente:***

Tratamiento de aguas residuales. Son procesos combinados donde se utiliza los parámetros físicos, químicos y biológicos para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales. En general estos procesos físicos se encargan de eliminar componentes o sustancias peligrosas exponiéndose de forma natural (Ryder, n.d., 2017).

Y = Tratamiento de agua residual

3.2.1. Operacionalización de las variables

Para demostrar la hipótesis anteriormente formulada se realizará la operacionalización de cada una de las variables e indicadores, tal como se muestra en la Tabla 8:

$$Y = f(X)$$

Tabla 8

Matriz de operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	TÉCNICA	INSTRUMENTO	MÉTODO
<i>Humedal artificial subsuperficial</i>	Los componentes del humedal artificial subsuperficial se evaluaron tomando en cuenta el cultivo de macrófitas y sustrato de acuerdo a las especies de Vetiver, Juncus y sustrato zeolita y Grava.	D.1 Cultivo de macrófitas	Vetiver	---	<i>Observación experimental</i>	----	<i>Hipotético-deductivo</i>
			Juncus	---			
		D.2 Sustrato	Zeolita	---			
			Grava	---			
VARIABLES DEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	TÉCNICA	INSTRUMENTO	MÉTODO
<i>Tratamiento de aguas residuales</i>	El tratamiento de aguas residuales se evaluó tomando en cuenta los parámetros físicos, químicos y biológicos mediante la medición de conductividad, turbidez, pH, DQO, Coliformes totales y Coliformes Termotolerantes cuyos valores se registraron en una ficha de recolección de datos.	D.1 Parámetros físicos	Turbidez	<i>NTU</i>	<i>Ficha de recolección de datos</i>	<i>Potenciómetro</i>	<i>Hipotético-deductivo</i>
			Conductividad	<i>Ms/cm</i>		<i>Multiparámetro</i>	
		D.2 Parámetros químicos	pH	Unidad de pH		<i>Multiparámetro</i>	
			DQO	mg/L		<i>Digestor, colorímetro, oxidación de viales</i>	
		D.3 Parámetros biológicos	Coliformes Totales	NMP/100 ml		<i>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Ed</i>	
			Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml		<i>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Ed</i>	

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

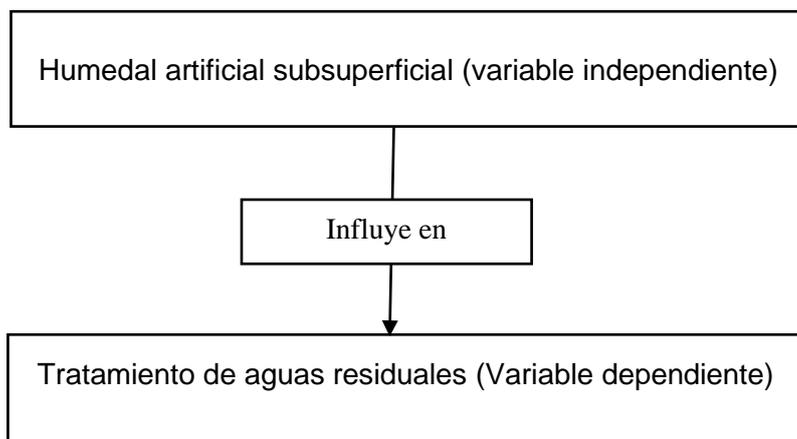
4.1.1. Tipo de investigación

Según Tamayo, (2004) este tipo de investigación es aplicada, porque busca la aplicación de los conocimientos adquiridos luego de haber planteado el problema y la hipótesis, se diseñó la manera de cómo obtener información para procesarlos y obtener resultados.

Adicionalmente, esta investigación es longitudinal, y analítica puesto que explica una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales empleando un humedal artificial subsuperficial.

Figura 4

Relación entre las variables de estudio



4.1.2. Diseño de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, porque se manipuló la variable independiente (humedal artificial de flujo subsuperficial) para evaluar sus componentes de operación sobre la variable dependiente (tratamiento de aguas residuales domésticas), se trabajó con grupos formados no aleatorizados.

Por tanto, su validez interna es pequeña porque no hay control sobre las variables externas. Estos diseños se aplican a situaciones reales en los que no

se pueden formar grupos aleatoriamente, pero pueden manipular a la variable experimental. (Hernández et al 2006:203).

El método de investigación es cuantitativo, ya que estudia los objetos y técnicas observables, a través de la observación, la experimentación y medición. Se realizaron los siguientes procedimientos como parte de la investigación:

i. Caracterización del agua residual

El agua residual se recolectó de la PTAR de la Municipalidad de Independencia, la cual capta los efluentes domésticos de los asentamientos humanos ubicados a su alrededor.

Se usó un volumen aproximado de 12 L por cada humedal artificial subsuperficial, haciendo un total de 96 litros de agua residual.

Posteriormente, se realizó una caracterización del agua residual, tomando en cuenta los parámetros físicos, químicos y biológicos, como se indica en la matriz de operacionalización.

Figura 5

Muestreo del agua residual en la PTAR del distrito de Independencia



ii. Acondicionamiento del lugar a experimentar

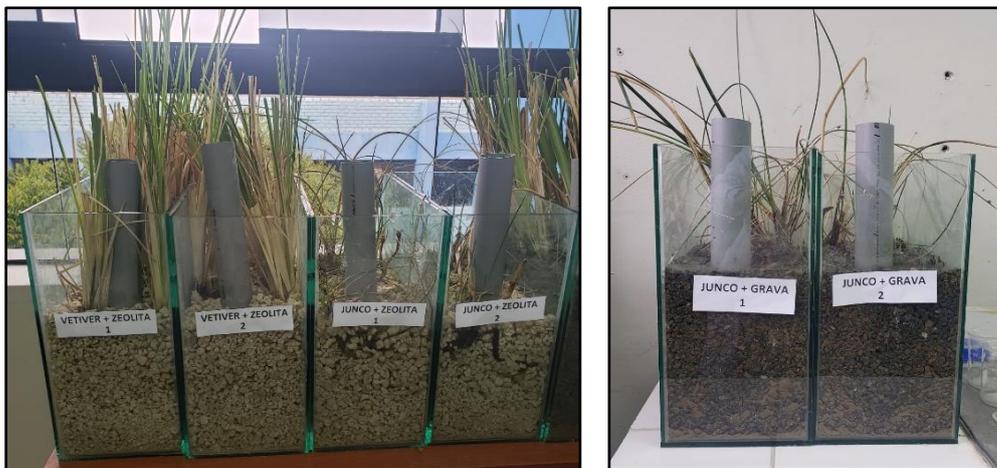
Para la ejecución de la presente investigación se acondicionó un espacio de 1.5 m de largo y 2.5 m de ancho en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao (UNAC).

iii. Diseño del Humedal artificial subsuperficial horizontal

Se construyeron ocho (8) humedales artificiales subsuperficiales de 40 cm de profundidad, 20 cm de ancho y 40 cm de largo, el material de construcción fue de vidrio reforzado de 0.4 mm de espesor. Esta relación es conforme a las recomendaciones de diseño de humedales artificiales por Reed y Col (1995) para una mayor eficiencia de remoción de contaminantes. Como parte del diseño se incrustó una tubería para respiradero de oxigenación del sustrato

Figura 6

Humedal artificial construido



Se utilizaron, por duplicado 4 humedales artificiales con las mismas características. Cada uno de ellos se encuentra conformado por un tipo de cultivo de macrófitas, un tipo de sustrato y agua residual.

En la Tabla 9 se muestran los humedales artificiales utilizados en esta investigación.

Tabla 9

Identificación de los humedales artificiales subsuperficiales

Código	Sustrato	Cultivo de macrófitas	Replica
1	Zeolita	Vetiver	R1
2	Zeolita	Vetiver	R2
3	Zeolita	Junco	R1
4	Zeolita	Junco	R2
5	Grava	Vetiver	R1
6	Grava	Vetiver	R2
7	Grava	Junco	R1
8	Grava	Junco	R2

iv. Selección de las macrófitas para el humedal subsuperficial horizontal

Se utilizó dos (2) tipos de cultivo de macrófitas: Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), y Junco (*Juncus spp.*), la cantidad de cada tipo de cultivo de macrófitas por cada humedal artificial subsuperficial construido fue de 8 plantas. El tamaño de cada especie fue aproximadamente de 60 cm de altura.

Las plantas de la especie junco fueron adquiridas del área natural protegida de los Pantanos de Villa, ubicada en el distrito de Chorrillos. Mientras que la especie de vetiver fue obtenida del jardín de la facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la UNAC.

Figura 7

Tipos de cultivo de macrófitas



v. Selección del tipo de sustrato

Para la presente investigación se usó dos (2) tipos de sustrato grava simple de $\frac{1}{4}$ de diámetro y zeolita mineral de $\frac{1}{4}$ de diámetro.

El sustrato se acondicionó en cada humedal artificial subsuperficial hasta llegar al tope del borde, manteniendo el nivel del agua por debajo. Sobre estos sustratos se acondicionarán las macrófitas de estudio (ver figura 7)

Figura 8

Acondicionamiento del sustrato zeolita en el humedal



vi. Diseño experimental

La investigación se desarrolló aplicando un diseño experimental factorial completo 2^2 , donde los factores fueron el tipo de sustrato y tipo de cultivo de macrófitas con dos niveles cada uno. Cada tratamiento se realizó por duplicado. La Tabla 10 muestra el diseño experimental.

El diseño factorial permite comparar el efecto de los factores manipulados en los distintos parámetros de respuesta y obtener una diferencia estadísticamente significativa.

Tabla 10*Diseño Factorial con Repeticiones para parámetros físicos, químicos y biológicos*

N°	Tratamientos	Réplica	pH			Conductividad			Turbidez			DQO		Coliformes Termotolerantes		Coliformes Totales	
			Unidades			uS/cm			NTU			mg/l		NMP/100 ml		NMP/100 ml	
			R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	Prom	R1	Prom	R1	Prom
1	Zeolita + Vetiver	R1															
2	Zeolita + Vetiver	R2															
3	Zeolita + Junco	R1															
4	Zeolita + Junco	R2															
5	Gravita + Vetiver	R1															
6	Gravita + Vetiver	R2															
7	Gravita + Junco	R1															
8	Gravita + Junco	R2															

4.2. Método de investigación

El método de investigación es hipotético-deductivo. En este método, las hipótesis son puntos de partida para nuevas deducciones. Se parte de una hipótesis inferida de principios o leyes o sugerida por los datos empíricos, y aplicando las reglas de la deducción, se arriba a predicciones que se someten a verificación empírica, y si hay correspondencia con los hechos, se comprueba la veracidad o no de la hipótesis de partida (Behar, 2008).

4.3. Población y muestra

Población: La población del estudio fueron las aguas residuales de la PTAR del distrito de Independencia. La unidad de Análisis esta dado por la unidad L/día.

Muestra: Para la toma de muestra se desarrolló un muestreo no probabilístico, donde interviene el criterio del investigador para seleccionar a las unidades muestrales Ñaupas et al., (2014)

La muestra corresponde a las alícuotas de 100 ml de aguas residuales luego de los tratamientos en los humedales. Esta fracción por ser representativa de la población permite determinar los diferentes parámetros del tratamiento de agua.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

La presente investigación toma como lugar de estudio el agua residual de la PTAR del distrito de Independencia, cuyos experimentos se realizaron en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales de la UNAC.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnica

La técnica empleada fue la observación, que consistió en registrar de forma sistemática y fiable los datos mediante un conjunto de procedimientos derivados del problema del estudio (Hernández et ál., 2014).

4.5.2. Instrumentos

Como instrumento de recolección de datos se emplearon los siguientes:

- Informe de ensayo de la caracterización del agua residual
- Informe de ensayo de parámetros microbiológicos
- Fichas experimentales

Para el llenado de la ficha experimental los indicadores de la variable dependiente se midieron mediante diferentes métodos analíticos como se muestra en el manual del Standar Method, referente al DQO, Coliformes, Turbidez, pH y Conductividad.

Los materiales y equipos del laboratorio que se usaron durante la parte experimental y analítica se detallan a continuación:

- Envases de PVC de 500 ml de color blanco para la toma de muestras del agua a analizar. (número de envases aprox.: 30)
- Galoneras de PVC de 10 galones color oscuro para las muestras de agua
- Reactivos (H₂SO₄ para la preservación del agua residual doméstica)
- Vasos de precipitado de 1 litro (6 vasos)
- Rotuladores.
- Placas Petri
- Agar para análisis de coliformes
- Multiparámetro (Modelo: HI 9811-5)

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Se usó el software MINITAB ver.22, para el desarrollo del diseño experimental y el procesamiento de datos. Se realizó los estadísticos descriptivos, determinando la media, la varianza y las desviaciones estándar.

También se aplicó el método inferencial, el modelo factorial se analizó en función del estadístico ANOVA. Los efectos de los factores y sus interacciones se midieron en función del p-value, R², R² ajustado.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Resultados de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual doméstica

Las aguas residuales de la PTAR del distrito de Independencia fueron recolectadas y envasadas cumpliendo con el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes establecidos para su muestreo y enviadas hasta el laboratorio para su caracterización, esta agua residual posee una clasificación de concentración baja (Ver anexo N° 2)

Tabla 11

Caracterización del agua residual

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura	°C	26.20
Conductividad	µS/cm	1 130.00
Turbidez	NTU	15.10
pH	unidad de pH	7.21
DQO	mg/L	73.50
DBO	mg/L	<2.00
Coliformes Totales	NMP/100ml	1100 000.00
Coliformes Termotolerantes	NMP/100ml	1100 000.00

Nota. Laboratorio Acreditado ALAB

5.1.2. Resultados descriptivos del tratamiento en los humedales

Luego del tratamiento en los humedales artificiales, la Tabla 12 muestra los resultados de los parámetros microbiológicos de los diferentes tratamientos, llegando todos los tratamientos a un 99% de remoción de coliformes termotolerantes y totales.

Tabla 12*Resultados experimentales para los parámetros microbiológicos*

N°	Bloque	Tratamiento	Coliformes Termotolerantes	%	Coliformes Totales	%
1	1	Grava + Vetiver	23.0	100.00	240	99.78
2	1	Zeolita + Junco	240.0	99.98	16 000	98.55
3	1	Grava + Junco	9.2	100.00	350	99.97
4	1	Zeolita + Vetiver	14.0	100.00	920	99.92
5	1	Zeolita + Junco	17.0	100.00	920	99.92
6	1	Grava + Vetiver	540.0	99.95	1 400	99.87
7	1	Grava + Junco	11.0	100.00	170	99.98
8	1	Zeolita + Vetiver	17.0	100.00	350	99.97

Nota: Coliformes (NMP/100ml), % porcentaje removido de coliformes

La Tabla 13 muestra los resultados de los diferentes tratamientos. Esta tabla representa las muestras promedias de los indicadores, la mayor remoción de DQO lo realizó el tratamiento de Zeolita con Junco con una remoción de 83,67%, de la misma forma los resultados del parámetro conductividad tuvieron una remoción de 99% en todos los tratamientos. El bloque representa el efecto de los tiempos de tratamientos en los parámetros físicos y químicos

Tabla 13*Resultados experimentales para los parámetros físicos y químicos*

N°	Bloque	Tratamiento			pH	Conductividad	Turbidez	DQO	% DQO
1	2	Grava	+	Vetiver	8.23	4.94	40.26	65.00	11.56
2	2	Zeolita	+	Vetiver	6.76	3.71	6.76	49.00	33.33
3	2	Zeolita	+	Junco	8.38	3.78	8.38	12.00	83.67
4	2	Grava	+	Vetiver	8.51	4.85	33.51	70.00	11.56
5	2	Zeolita	+	Junco	8.39	4.09	8.39	13.00	82.31
6	2	Zeolita	+	Vetiver	8.64	2.70	8.64	59.00	19.73
7	2	Grava	+	Junco	8.37	5.07	36.37	138.00	0.00
8	2	Grava	+	Junco	8.21	4.64	48.42	115.00	0.00
9	1	Zeolita	+	Junco	7.52	6.16	40.76	155.00	4.76
10	1	Zeolita	+	Vetiver	7.60	6.03	34.96	70.00	0.00
11	1	Grava	+	Junco	7.69	6.37	51.10	183.00	0.00
12	1	Zeolita	+	Vetiver	7.55	5.60	35.89	78.00	0.00
13	1	Zeolita	+	Junco	7.49	6.33	40.28	162.00	0.00
14	1	Grava	+	Vetiver	7.08	6.51	39.25	91.00	0.00
15	1	Grava	+	Junco	6.98	5.71	46.18	115.00	0.00
16	1	Grava	+	Vetiver	7.03	5.72	42.92	96.00	0.00

Nota. Conductividad, expresada en uS/cm²; pH en unidades; Turbidez en NTU; DQO en mg/L

La Tabla 14 muestra los estadísticos descriptivos por tipo de sustrato. Los resultados muestran que el pH se encuentra en un rango de 6.76 y 8.64 para los tratamientos de Zeolita y Grava. Mientras que, los resultados mínimos para los parámetros: Conductividad fue de 2.7 mS/cm, Turbidez de 6.76 y DQO de 12 mg/L en el tratamiento con el sustrato de Zeolita; con respecto a los parámetros microbiológicos los valores mínimos se evidenciaron en el tratamiento con grava, siendo los valores para los Coliformes Termotolerantes de 9.20 NMP/100ml y Coliformes Totales de 170 NMP/100ml con el tratamiento del sustrato de grava.

Comparando los parámetros estudiados, la Tabla 14 muestra que la media del pH y la conductividad son similar en la zeolita y la grava manteniendo una desviación estándar de pequeño rango. La turbidez y el DQO presenta medias diferentes siendo la zeolita con menor DQO y turbidez.

Las medias de los Coliformes Totales y Termotolerantes difieren en su totalidad siendo la zeolita con mayor remoción de coliformes Termotolerantes y la grava de coliformes totales. La desviación estándar tiene rangos altos para los coliformes esto debido la naturaleza analítica para la detección de coliformes.

Tabla 14*Descriptivos estadísticos por tipo de sustrato*

Variable	Tipo de sustrato	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
pH	Zeolita	8	7.789	0.221	0.625	6.760	7.494	7.574	8.386	8.635
	Grava	8	7.762	0.23	0.650	6.982	7.043	7.946	8.335	8.510
Conductividad	Zeolita	8	4.799	0.491	1.390	2.700	3.723	4.844	6.130	6.333
	Grava	8	5.474	0.251	0.710	4.635	4.871	5.388	6.207	6.508
Turbidez	Zeolita	8	23.000	5.700	16.130	6.760	8.380	21.800	39.180	40.750
	Grava	8	42.250	2.140	6.050	33.510	37.090	41.580	47.860	51.090
DQO	Zeolita	8	74.800	20.200	57.000	12.000	22.000	64.500	135.800	162.000
	Grava	8	109.100	13.600	38.400	65.000	75.300	105.500	132.300	183.000
Coliformes Termotolerantes	Zeolita	4	71.300	56.300	112.500	14.000	14.000	15.500	184.300	240.000
Coliformes Totales	Grava	4	146.000	131.000	263.000	9.000	10.000	17.000	411.000	540.000
	Zeolita	4	4548.000	3820.000	7640.000	350.000	493.000	920.000	12230.000	16000.000
	Grava	4	1080.000	517.000	1034.000	170.000	215.000	875.000	2150.000	2400.000

Nota. Conductividad expresada en uS/cm², pH en unidades, Turbidez en NTU, DQO en mg/L, Coliformes (NMP/100ml)

La Tabla 15 muestra los estadísticos descriptivos por tipo de macrófitas. Los resultados muestran que el pH se encuentra en un rango de 6.76 y 8.64 para los tratamientos de Vetiver y Junco. Mientras que, los resultados mínimos para los parámetros Conductividad es de 2.7 mS/cm y Turbidez de 6.76, en tratamiento con el tipo de cultivo Vetiver, en tanto que con el tratamiento de tipo de macrófita junco los valores mínimos para el DQO es de 12 mg/L, Coliformes Termotolerantes 9.2 NMP/100ml y Coliformes Totales 170 NMP/10ml.

Comparando los parámetros estudiados, la Tabla 15 muestra que la media del pH y la conductividad son similar al vetiver y el junco manteniendo una desviación estándar de pequeño rango. La turbidez y el DQO presenta medias diferentes siendo el vetiver con menor media de DQO y turbidez.

Las medias de los coliformes totales y Termotolerantes difieren en su totalidad siendo el junco con mayor remoción de coliformes Termotolerantes y la grava de coliformes totales. La desviación estándar tiene rangos altos para los coliformes esto debido la naturaleza analítica para la detección de coliformes.

Tabla 15*Descriptivos estadísticos por tipo de planta*

Variable	Tipo de planta	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
pH	Vetiver	8	7.674	0.252	0.713	6.760	7.043	7.574	8.440	8.635
	Junco	8	7.877	0.188	0.532	6.982	7.494	7.946	8.374	8.390
Conductividad	Vetiver	8	5.006	0.447	1.265	2.700	3.991	5.267	5.952	6.508
	Junco	8	5.268	0.364	1.028	3.775	4.226	5.388	6.291	6.370
Turbidez	Vetiver	8	30.270	5.040	14.270	6.760	14.850	35.420	40.000	42.910
	Junco	8	34.980	6.040	17.090	8.380	15.390	40.520	47.860	51.090
DQO	Vetiver	8	72.250	5.550	15.710	49.000	60.500	70.000	87.750	96.000
	Junco	8	111.600	23.100	65.300	12.000	38.500	126.500	160.300	183.000
Coliformes Termotolerantes	Vetiver	4	148.000	131.000	262.000	14.000	14.000	19.000	411.000	540.000
	Junco	4	69.300	56.900	113.800	9.200	9.600	14.000	184.300	240.000
Coliformes Totales	Vetiver	4	1268.000	434.000	868.000	350.000	493.000	1160.000	2150.000	2400.000
	Junco	4	4360.000	3883.000	7767.000	170.000	215.000	635.000	12230.000	16000.000

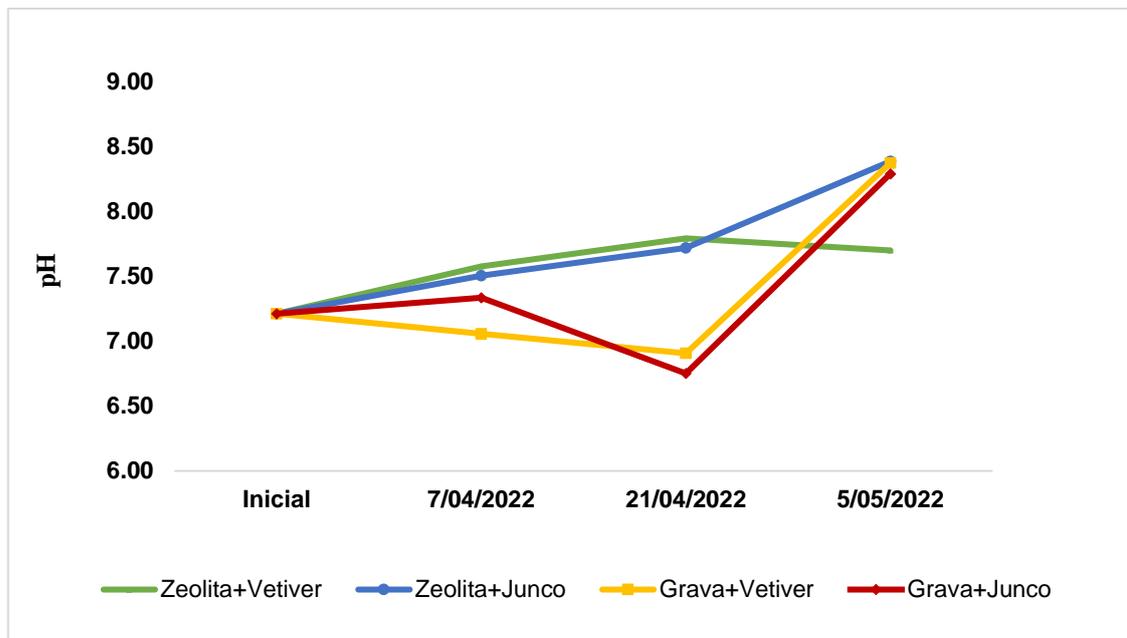
Nota. Conductividad expresada en uS/cm², pH en unidades, Turbidez en NTU, DQO en mg/L, Coliformes (NMP/100ml)

El efecto del tiempo permite mostrar la evolución del comportamiento de cada indicador y como se acondicionan los tratamientos. Las plantas como el vetiver y el junco se acondicionan al paso del tiempo en el sistema, por lo tanto, el tiempo es importancia en esta investigación.

La Figura 9 muestra el comportamiento del pH con respecto al tiempo de tratamiento en los humedales construidos (4 tratamientos). Se muestra que el rango de los 4 tratamiento se mantiene entre 6.5 y 8 en unidades de pH, siendo el sustrato de la Zeolita ligeramente más alcalina que la grava, esta diferencia empieza a ser más significativa a medida que el tiempo se incrementa.

Figura 9

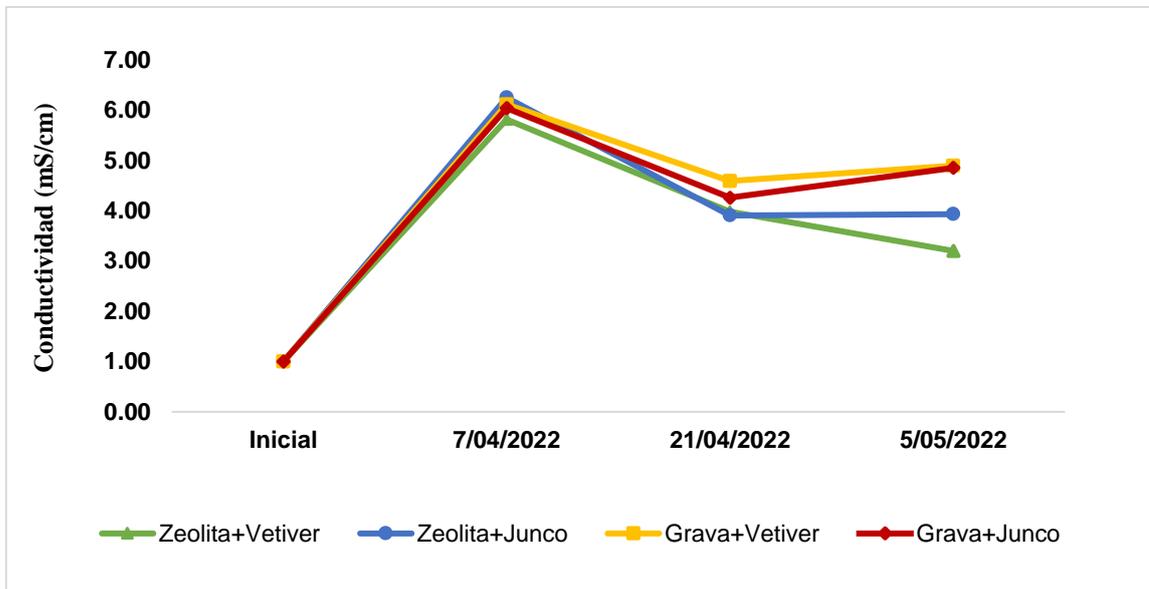
Variación del pH



La Figura 10 muestra el comportamiento de la conductividad con respecto al tiempo de tratamiento en los humedales construidos (4 tratamientos). En el primer monitoreo la conductividad se mantenía alta para luego disminuir a lo largo del tiempo. Mientras que en el segundo monitoreo la conductividad disminuye considerablemente hasta mantenerse estable en cada tratamiento.

Figura 10

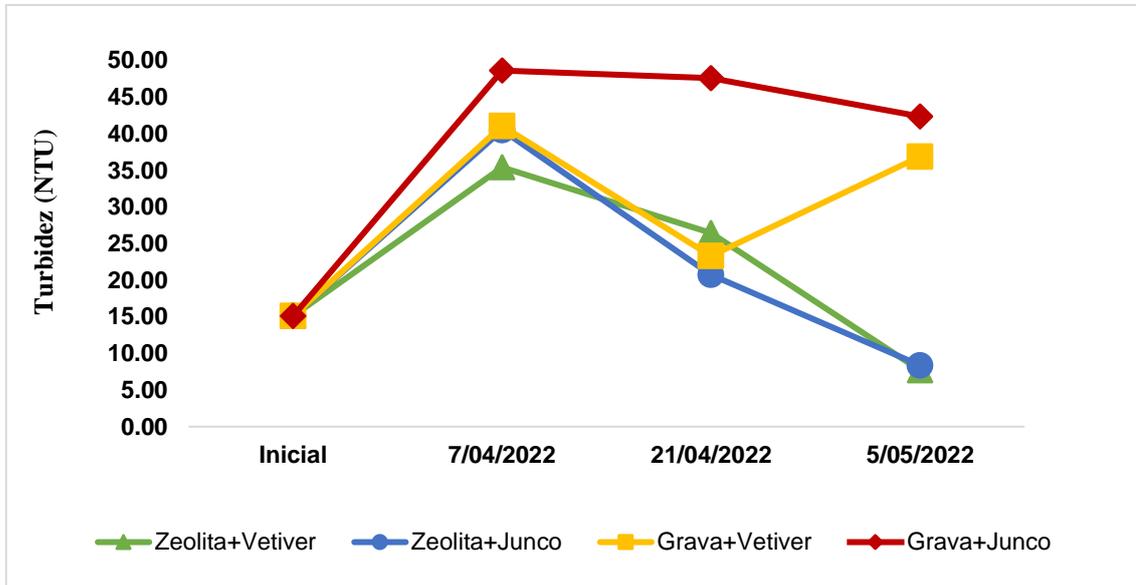
Variación de la conductividad



La Figura 11 muestra la variación de la turbidez con respecto al tiempo de tratamiento en los humedales construidos (4 tratamientos). En la primera toma de muestra se puede evidenciar que los sistemas se encontraban en la etapa de acondicionando, manteniendo una tendencia homogénea, ya en el segundo monitoreo el tratamiento del sustrato grava y junco se mantiene con alta turbidez, mientras que, en los tratamientos con el sustrato zeolita sea vetiver o junco disminuyen sustancialmente.

Figura 11

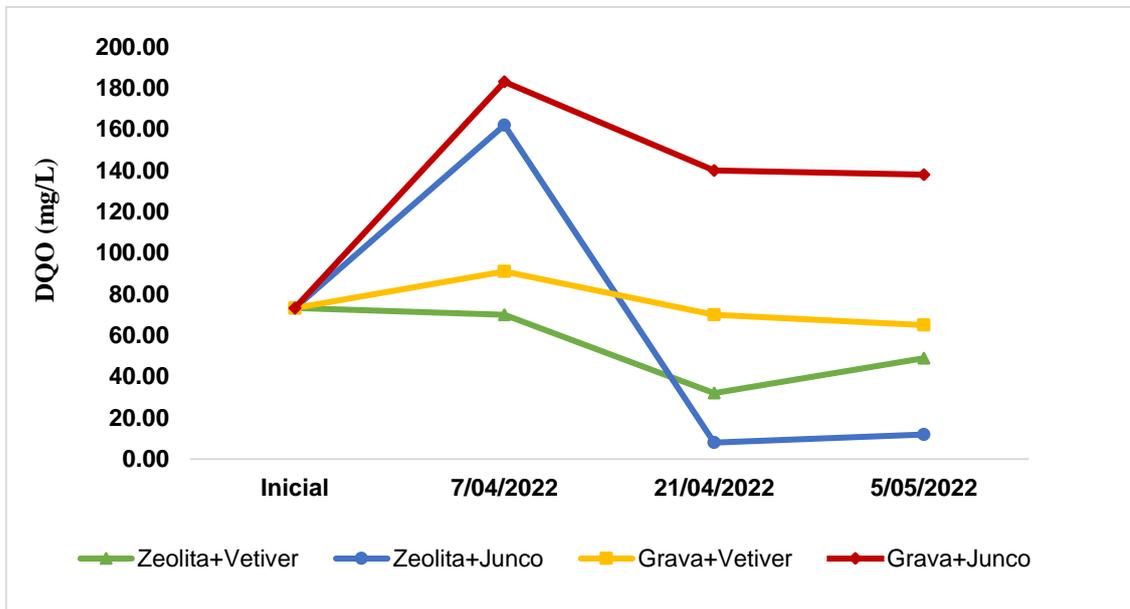
Variación de la Turbidez



La Figura 12 muestra la variación de la DQO con respecto al tiempo de tratamiento en los humedales construidos (4 tratamientos). El tratamiento de zeolita con la especie vetiver y la grava con vetiver presentan una disminución progresiva en el tratamiento, mientras que el DQO en el tratamiento de la grava con la especie junco se mantiene alto, con respecto al tratamiento de Zeolita con Junco esta presenta una mayor disminución en la segunda semana a diferencia de los otros tratamientos para luego estabilizarse.

Figura 12

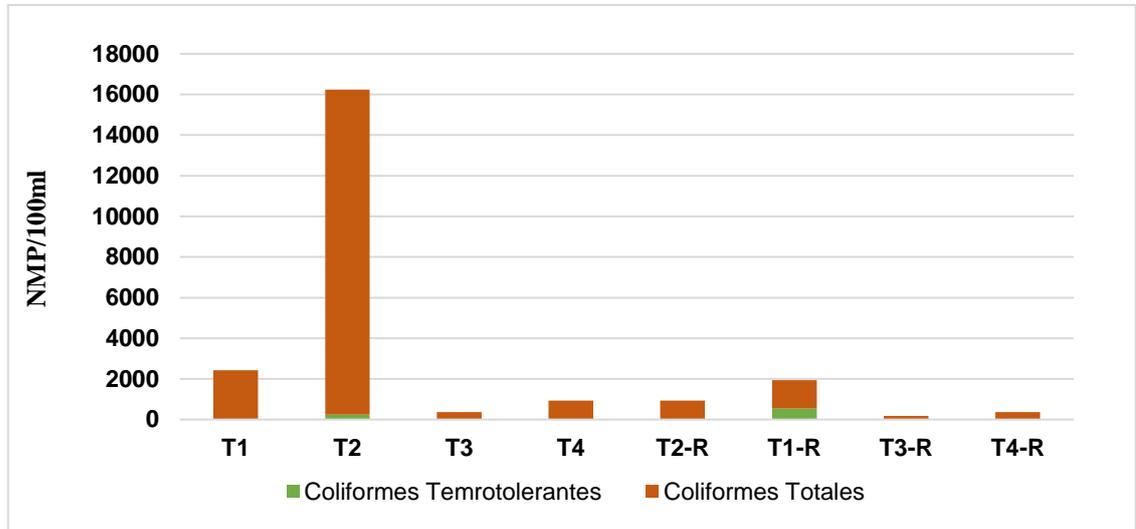
Variación del DQO



La Figura 13 muestra la variación de los coliformes Totales y Termotolerantes por con respecto al tiempo de tratamiento en los humedales construidos (4 tratamientos). Todos los tratamientos muestran una alta remoción de coliformes totales y Termotolerantes. Los tratamientos de zeolita con junco presentan la mayor cantidad de coliformes entre los demás tratamientos, existe una presencia casi nula de coliformes Termotolerantes en todos los tratamientos.

Figura 13

Comparación de coliformes totales y Termotolerantes



Nota. T1 Zeolita+vetiver; T2 Zeolita+junco; T3 Grava+vetiver; T4 grava+junco.

5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Resultados del ANOVA del pH

La Tabla 16 muestra el análisis ANOVA del pH. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 2.82 y un valor de $p > 0,05$, lo cual indica que el modelo es no significativo para explicar el comportamiento del pH en los diferentes tratamientos en los humedales.

Tabla 16

Matriz ANOVA del pH

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	2.88560	0.72140	2.82	0.078
Bloques	1	2.67459	2.67459	10.45	0.008
Lineal	2	0.16743	0.08372	0.33	0.728
Tipo de sustrato	1	0.00307	0.00307	0.01	0.915
Tipo de Cultivo macrófitas	1	0.16436	0.16436	0.64	0.440
Interacciones de 2 términos	1	0.04358	0.04358	0.17	0.688
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	0.04358	0.04358	0.17	0.688
Error	11	2.81415	0.25583		
Falta de ajuste	3	0.75163	0.25054	0.97	0.452
Error puro	8	2.06252	0.25782		
Total	15	5.69975			

5.2.2. Resultados del ANOVA de la conductividad

La Tabla 17 muestra el análisis ANOVA de la conductividad. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 15.00 y un valor de $p < 0,05$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el comportamiento de la conductividad en los diferentes tratamientos en los humedales.

Tabla 17
Matriz ANOVA de la Conductividad

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	15.9531	3.9883	15.00	0.000
Bloques	1	13.4475	13.4475	50.56	0.000
Lineal	2	2.0966	1.0483	3.94	0.051
Tipo de sustrato	1	1.8214	1.8214	6.85	0.024
Tipo de Cultivo macrófita	1	0.2752	0.2752	1.03	0.331
Interacciones de 2 términos	1	0.4091	0.4091	1.54	0.241
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	0.4091	0.4091	1.54	0.241
Error	11	2.9255	0.2660		
Falta de ajuste	3	1.6330	0.5443	3.37	0.075
Error puro	8	1.2925	0.1616		
Total	15	18.8787			

Se demuestra que el tipo de sustrato es significativo ya que $p=0.024$ para la conductividad, asimismo, el efecto del bloque está representado por el tiempo de tratamiento y tiene un efecto significativo en el modelo ANOVA.

La Tabla 18 muestra que el efecto del tipo de sustrato es estadísticamente significativo teniendo una razón de cambio de 0.675. Así también se observa que el valor de $R^2=0,8450$ está en razonable concordancia con el valor de $R^2_{adj}=0,7887$, teniendo una diferencia menor a 0.70, esto implica que este indicador de ajuste global del modelo no es adecuado, es decir, el modelo explica solo el 78.87% del comportamiento de la conductividad en los humedales.

Tabla 18*Coefficientes codificados para el modelo de la conductividad*

Fuente	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		5.137	0.129	39.84	0.000	
Bloque 1		0.917	0.129	7.11	0.000	1.00
Tipo de sustrato	0.675	0.337	0.129	2.62	0.024	1.00
Tipo de Cultivo macrófita	0.262	0.131	0.129	1.02	0.331	1.00
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	-0.320	-0.160	0.129	-1.24	0.241	1.00

5.2.3. Resultados del ANOVA de la Turbidez

La Tabla 19 muestra el análisis ANOVA de la Turbidez. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 10.49 y un valor de $p < 0,05$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el comportamiento de la Turbidez en los diferentes tratamientos en los humedales. Los efectos principales de los factores independiente en el modelo como el tipo de sustrato, es estadísticamente significativo en el nivel de significancia de 0.05 así también, el efecto del tiempo que esta presentada por el efecto del bloque es significativo.

Así también se observa que el valor de $R^2 = 0.7924$ está en razonable concordancia con el valor de $R^2 \text{ adj} = 0.7169$, teniendo una diferencia menor a 0,80; esto implica que este indicador de ajuste global del modelo no es adecuado, es decir, el modelo explica solo el 71.69% del comportamiento de la turbidez en los humedales.

Tabla 19*Matriz ANOVA de la Turbidez*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	2818.84	704.71	10.49	0.001
Bloques	1	1235.52	1235.52	18.40	0.001
Lineal	2	1570.07	785.04	11.69	0.002
Tipo de sustrato	1	1481.29	1481.29	22.06	0.001
Tipo de Cultivo macrófita	1	88.78	88.78	1.32	0.275
Interacciones de 2 términos	1	13.25	13.25	0.20	0.666
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	13.25	13.25	0.20	0.666
Error	11	738.69	67.15		
Falta de ajuste	3	622.28	207.43	14.25	0.001
Error puro	8	116.41	14.55		
Total	15	3557.54			

Para mayor detalle, la Tabla 20 muestra que existe efectos principales e independientes en el tipo de sustrato es estadísticamente significativo en el nivel de significancia de 0.05. El coeficiente muestra que por cada cambio en el Tipo de sustrato la turbidez incrementa en 19.24.

Tabla 20
Coeficientes codificados

Fuente	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		32.63	2.05	15.93	0.000	
Bloque 1		8.79	2.05	4.29	0.001	1.00
Tipo de sustrato	19.24	9.62	2.05	4.70	0.001	1.00
Tipo de Cultivo macrófita	4.71	2.36	2.05	1.15	0.275	1.00
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1.82	0.91	2.05	0.44	0.666	1.00

5.2.4. Regresión ANOVA del DQO

La Tabla 21 muestra el análisis ANOVA del DQO. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 4.62 y un valor de $p < 0,05$, lo cual indica que el modelo es significativo para explicar el comportamiento del DQO en los diferentes tratamientos en los humedales. Los efectos principales de los factores independiente en el modelo es el tipo de plantas siendo estadísticamente significativo en el nivel de significancia de 0.05 así también, el efecto del tiempo que esta presentada por el bloque es significativo.

Tabla 21
Matriz ANOVA del DQO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	23709	5927.2	4.62	0.020
Bloques	1	11503	11502.6	8.97	0.012
Lineal	2	10928	5464.1	4.26	0.043
Tipo de sustrato	1	4727	4726.6	3.69	0.081
Tipo de Cultivo macrófita	1	6202	6201.6	4.84	0.050
Interacciones de 2 términos	1	1278	1278.1	1.00	0.340
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	1278	1278.1	1.00	0.340
Error	11	14104	1282.2		
Falta de ajuste	3	11396	3798.6	11.22	0.003
Error puro	8	2709	338.6		
Total	15	37813			

Así también se observa que el valor de $R^2=0.6270$ está en razonable concordancia con el valor de $R^2 \text{ adj}=0.4919$, teniendo una diferencia menor a 0,40, esto implica que este indicador de ajuste global del modelo no es adecuado, es decir, el modelo explica solo el 62.70% del comportamiento de la DQO en los humedales.

Para mayor detalle, la Tabla 22 muestra que existe efectos principales e independientes como el tipo de planta siendo estadísticamente significativos en el nivel de significancia de 0.05. El coeficiente muestra que por cada cambio en el Tipo de planta el DQO se incrementa en 39.37.

Tabla 22
Coeficientes codificados

Fuente	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		91.94	8.95	10.27	0.000	
Bloque 1		26.81	8.95	3.00	0.012	1.00
Tipo de sustrato	34.37	17.19	8.95	1.92	0.081	1.00
Tipo de Cultivo macrófita	39.37	19.69	8.95	2.20	0.050	1.00
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	17.87	8.94	8.95	1.00	0.340	1.00

5.2.5. Regresión ANOVA de los Coliformes Termotolerantes

La Tabla 23 muestra el análisis ANOVA para el coliformes Termotolerantes. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 0.82 y un valor de $p>0,05$, lo cual indica que el modelo es no significativo para explicar el comportamiento de los coliformes Termotolerantes en los diferentes tratamientos en los humedales.

Tabla 23
Matriz ANOVA de los Coliformes Termotolerantes

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	97884	32628	0.82	0.545
Lineal	2	23424	11712	0.30	0.759
Tipo de sustrato	1	11115	11115	0.28	0.624
Tipo de Cultivo macrófita	1	12309	12309	0.31	0.607
Interacciones de 2 términos	1	74459	74459	1.88	0.242
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	74459	74459	1.88	0.242
Error	4	158511	39628		
Total	7	256394			

5.2.6. Regresión ANOVA de los Coliformes Totales

La Tabla 24 muestra el análisis ANOVA para el coliformes Totales. En este análisis se muestra que el valor F del modelo es 1.03 y un valor de $p > 0,05$, lo cual indica que el modelo es no significativo para explicar el comportamiento de los Coliformes Totales en los diferentes tratamientos en los humedales.

Tabla 24

Matriz ANOVA de los Coliformes Termotolerantes

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	87967338	29322446	1.03	0.470
Lineal	2	43174225	21587113	0.75	0.527
Tipo de sustrato	1	24047113	24047113	0.84	0.411
Tipo de Cultivo macrófita	1	19127113	19127113	0.67	0.459
Interacciones de 2 términos	1	44793112	44793112	1.57	0.279
Tipo de sustrato * Tipo de cultivo macrófita	1	44793112	44793112	1.57	0.279
Error	4	114381850	28595463		
Total	7	202349188			

Al no ser el modelo significativo tanto el R^2 y el R^2 ajustado no tienen representatividad en el comportamiento de los datos obtenidos.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Las hipótesis se discutirán en función de las dimensiones de las variables independiente y dependiente.

6.1.1. Hipótesis específica 1

H₀: El tipo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial no tiene un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.

H₁: El tipo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tiene un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.

Según la Tabla 21 tipo de macrófitas presenta una significancia con un $p < 0.05$ en el indicador de DQO; entonces **se acepta la Hipótesis Nula (H₀) y se rechaza la alternativa**. Definiendo que existe un tipo de macrófitas como componente de operación de un humedal artificial subsuperficial se evidencia que tiene un efecto significativo en la remoción de DQO con un valor $p < 0.05$. Mientras no tiene un efecto significativo en los demás parámetros de estudio.

Los parámetros como el pH y los coliformes no tienen un modelo representativo, por lo tanto, no presentan ningún efecto significativo sobre el tipo de sustrato.

6.1.2. Hipótesis específica 2

H₀: El tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial no tiene un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.

H₁: El tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tiene un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.

Según la Tabla 17 y la Tabla 19 el tipo de sustrato presenta una significancia con un $p < 0.05$ en los indicadores de conductividad y turbidez; respectivamente, entonces se acepta la Hipótesis Nula (H_0) y **se rechaza la alternativa**. Definiendo que existe un tipo de sustrato como componente de operación de un humedal artificial subsuperficial se evidencia que tiene un efecto significativo en la Turbidez y Conductividad con un valor $p < 0.05$. Mientras no tiene un efecto significativo en los demás parámetros de estudio.

Los parámetros como el pH y los coliformes no tienen un modelo representativo, por lo tanto, no presentan ningún efecto significativo sobre el tipo de planta y el tipo de planta.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

El resultado obtenido con el tratamiento de Vetiver con Junco muestra una remoción de DQO de 83.67%, en contraste con los estudios presentados en antecedentes se muestra que los humedales tienden a remover materia orgánica medidos en función del DQO. Se muestra remociones de 77% a 94% en DQO (Parrao, 2018), 90-95% DQO (Aguilar 2020), 82% DQO (Moreno & Rangel 2018), 82.8% DQO (Guillermo & Luis 2018), 76.85 % DQO (Cantoral 2015).

El mecanismo de eliminación de contaminantes de los humedales construidos incluye procesos físicos, químicos y biológicos. El proceso físico implica la sedimentación de las partículas en suspensión presentes en las aguas residuales que conduce a la eliminación de contaminantes. Los macrófitos utilizados en el humedal proporcionan una gran área de superficie para el crecimiento microbiano que ayuda a estabilizar la materia orgánica y mejora el funcionamiento de la filtración física y también evita que el sistema de flujo vertical se obstruya (Parde et al., 2021).

Los humedales con Zeolita y Junco han resultado con la mayor reducción del DQO. Estudios anteriores demostraron que la remoción de DQO puede quedar permanentemente inmovilizado en los sedimentos de los humedales si existe un ambiente anaeróbico en los lechos (Johnston et al., 2014) como en los tratamientos de humedales con zeolita que presentan mayor porosidad permiten

una mejor remoción de los indicadores en el tratamiento de agua. Sin embargo, los tratamientos que presentan grava presentaron una más baja en la reducción de turbidez y DQO, pero con una elevación de conductividad y turbidez alta asociada a la grava, esto debería estar relacionado con baja remoción de carga orgánica.

La mezcla de zeolita y otros sustratos puede compensar la deficiencia de la grava y mejorar la eficiencia de purificación y la estabilidad del proceso de purificación. Ya sea un solo sustrato de zeolita o grava en los humedales.

Se contrasta en la Tabla 25 con otros estudios de uso de zeolita en humedales que trataron agua residual urbana.

Tabla 25

Comparación de otros estudios que usaron Zeolita como sustrato y este estudio

Tipo de agua	Indicador de contaminación	Sustrato	Referencia
	DQO		
	84.41	Zeolita y Grava	(Zhang, 2015)
Agua residual	40.9-76.6	Zeolita	(Chen et al., 2019)
urbana	28.25	Zeolita	(Kong et al., 2017)
	>80%	Zeolita	(Liang et al., 2016)
	83.67	Zeolita	Este estudio

En esta investigación, la presencia de la Vetiver y Junco no hizo una contribución significativa a la reducción de DQO y Turbidez lo cual fue consistente con el resultado del estudio previo de Chen et al., (2014) y Y. Chen et al., (2016), a diferencia de la Vetiver, la adición de grava estimuló en gran medida la reducción de carga orgánica y la turbidez, pero presento una alta de pH igual que esta investigación. La vegetación cumple un rol importante en los humedales, algunos estudios han demostrados la eficiencia de otro tipo de plantas en los humedales como se puede ver en la Tabla 26.

Tabla 26*Comparación de otros estudios que usaron otras macrófitas y este estudio*

Tipo de agua	Indicador de contaminación	Tipo de planta	Referencia
	DQO		
Agua residual urbana	69%	Lemna minor, Cyperus	(Yinanc & Adiloğlu, 2017)
	83%	Phragmites australis	(Gunes et al., 2013)
	69%	Phragmites australis y aloevera	(Esmeray & Armutcu, 2020)
	83.60%	Junco	Este estudio

La influencia de las macrófitas en la remoción de DQO ha sido demostrado en estudios como Aguilar (2020) donde uso cartucho (*Zantedeschia*), achira (*Canna spp*) y lirio (*Iris spp*) llegando a remociones de mayores al 90% y remociones de coliformes mayores al 80%. Usando Vetiver Moreno & Rangel (2018) reporta valores de remoción de DQO de 82%, Santana Suárez & Santos Tello (2016) remociones de turbiedad de 76%.

Sobre la eficiencia de remoción Mena (2014) reporta valores mayores al 80%, Guillermo & Luis (2018) remociones de DQO de 828% y remoción de coliformes de 99% valores similares a lo reportado en este estudio.

6.3. Responsabilidad ética

La presente investigación titulada “EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DE OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL DISTRITO DE INDEPENDENCIA, LIMA, 2022” ha sido elaborado conforme al anexo 4 Estructura del Informe Final de investigación de la directiva N° 013-2018-R, directiva que aprueba los Protocolos de proyectos e informe final de investigación de pregrado y en concordancia con el Código de ética de la Universidad Nacional del Callao.

Asimismo, en el desarrollo de esta investigación no se incurrió al plagio parcial o total de otros autores, asegurándose que la información utilizada cumple con la validez y confiabilidad de todas las fuentes bibliográficas

empleadas en la elaboración del presente estudio; de igual forma, el contenido de la investigación se desarrolló de acuerdo con las normas y estándares de la Universidad Nacional del Callao.

VII. CONCLUSIONES

- En esta investigación se pudo evaluar los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima, 2022, mostrando resultados significativos en los diferentes tratamientos.
- Se determinó el efecto del tipo de macrófitas como componente de operación de un humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima. De los parámetros estudiado el DQO presentaron un efecto significativo por la presencia de los tipos de plantas macrófitas. De los 2 tipos de plantas usadas en la experimentación El junco reporta mayores eficiencias en la remoción de contaminantes.
- Se determinó el efecto del tipo de sustrato como componente de operación de un humedal artificial subsuperficial en el tratamiento del agua residual del distrito de Independencia, Lima. De los parámetros estudiado la Turbidez y la conductividad presentaron un efecto significativo por la presencia de los tipos de sustratos. De los 2 tipos de sustratos usadas en la experimentación la zeolita reporta mayores eficiencias en la remoción de contaminantes.
- Los parámetros de pH y los Coliformes Totales y Termotolerantes no son significativos en los tratamientos, puesto que los resultados muestran un rango de pH ligeramente alcalino, una disminución de la turbidez y una remoción del 99.9% de coliformes en todos los tratamientos.
- Se concluye que los usos de zeolita juntamente con el junco permiten la mayor remoción de los contaminantes así también promueve la alta reducción de Coliformes Termotolerantes y Totales.

VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer análisis más exhaustivos a la composición de la planta analizando adaptabilidad, ya que mediante esta tesis solo se hizo anotaciones observatorio.
- Investigar el comportamiento de la biopelícula generada en los sustratos del humedal.
- Realizar el análisis SEM, DRX y otros, para determinar la composición elemental y estructuras morfológicas en los sustratos.
- Realizar más experimentos con otros sustratos mineralizados como calcita, dolomitas, etc.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Arias, D. E. (2020). *Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Internacional SEK*.
- Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., Sáez, V., & Gladys, C. (2018). *Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*.
- Baca Neglia, Maximo Fidel. (2012). *Tratamiento de los efluentes domésticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de San Juan de Marcona*.
- Baca Neglia, Máximo Fidel. (2012). Tratamiento de los efluentes domesticos mediante humedales artificiales para el riego de áreas verdes en el distrito de Marcona. In *Tesis*. Universidad Nacional del Callao.
- Barbier, E. B., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). Economic valuation of wetlands. In *Journal of environmental biology / Academy of Environmental Biology, India* (Vol. 26, Issue 2 Suppl).
- Behar, D. (2008). *Introducción a la metodología de la investigación. sf: Edición: A. Rubeira*.
- Bruch, I., Fritsche, J., Bänninger, D., Alewell, U., Sendelov, M., Hürlimann, H., Hasselbach, R., & Alewell, C. (2011). Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource Technology*, 102(2), 937–941.
- Cantoral, R. (2015). Tratamiento De Aguas Residuales Grises Domésticas Con La Especie Paragüitas (*Cyperus alternifolius*) En Humedales Artificiales, Urbanización Zárate–San Juan de Lurigancho 2015. *Universidad César Vallejo, Perú*.
- Carrión, C. G. (2008). Manual técnico de difusión-Sistema de tratamiento de aguas residuales para albergues en zonas rurales. *Lima-Perú. Edición. Ministerio de Comercio Exterior y Turismo*.

- Cejas Barja, M. del C. (2021). *Implementación piloto de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal en la Universidad Nacional de Moquegua, para el tratamiento del agua residual de la laguna primaria de la planta de tratamiento de agua residual–PTAR del distrito de Pacocha.*
- Chafloque, W. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 9(17), 85–96.
- Chen, Y., Wen, Y., Zhou, J., Tang, Z., Li, L., Zhou, Q., & Vymazal, J. (2014). Effects of cattail biomass on sulfate removal and carbon sources competition in subsurface-flow constructed wetlands treating secondary effluent. *Water Research*, 59, 1–10.
- Chen, Y., Wen, Y., Zhou, Q., Huang, J., Vymazal, J., & Kuschik, P. (2016). Sulfate removal and sulfur transformation in constructed wetlands: The roles of filling material and plant biomass. *Water Research*, 102, 572–581.
- Crites, R., Tchobanoglous, G., Camargo, M., Pardo, L., & Mejía, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones.* McGraw-Hill.
- Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.* Nelson Antequera.
- Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A. R., & Camacho-Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 78–97.
- Díaz Acero, C. A. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, (Pág. 6).* Bogotá.
- Eduardo, R. D. (2014). *Caracterización física, absorción de potasio y producción de tomate (Lycopersicon esculentum) por efecto del reúso del tezontle y perlita.*

- Fernández, J., & MIGUEL, E. (2004). Manual de fitodepuración, Ayuntamiento de Lorca. *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*.
- García Rospigliosi, L. A. (2021). *Sostenibilidad de un humedal artificial de flujo vertical, para el tratamiento de aguas contaminadas con fines de reúso*.
- Ghermandi, A., Bergh, J. C. J. M. van den, Brander, L. M., Groot, H. L. F. de, & Nunes, P. A. L. D. (2010). Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis. *Water Resources Research*, 46(12), 12516. <https://doi.org/10.1029/2010WR009071>
- Guillermo, E., & Luis, G. (2018). *Implementación de humedal artificial en el tratamiento de agua residual doméstica del proyecto Don Javier 79, Yarabamba–Arequipa*.
- Henry Pinilla, D. A. (2015). *Remoción de arsénico de agua contaminada utilizando zeolita y piedra caliza: evaluación experimental de la capacidad de remoción y su potencial aplicación como medios de soporte en humedales artificiales*.
- Hernández Vásquez, W. (2017). *Tratamiento de Aguas Residuales Empleando las Especies Achira (Canna Índica) y Carrizo (Pragmites Australis) a través de Humedales Artificiales, Chalamarca 2017*.
- Hopkinson, C. S., Wolanski, E., Cahoon, D. R., Perillo, G. M. E., & Brinson, M. M. (2018). Coastal wetlands: A synthesis. In *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00001-0>
- Johnston, S. G., Burton, E. D., Aaso, T., & Tuckerman, G. (2014). Sulfur, iron and carbon cycling following hydrological restoration of acidic freshwater wetlands. *Chemical Geology*, 371, 9–26.
- Knight, R. ., Clarke, R. A., & Bastian, R. K. (2001). Surface flow (SF) treatment wetlands as a habitat for wildlife and humans. *Water Science and Technology*, 44(11–12), 27–37. <https://doi.org/10.2166/WST.2001.0806>
- Li, D., & Liu, S. (2019). Detection of River Water Quality. In *Water Quality Monitoring and Management* (pp. 211–220). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00007-7>

- Manotupa Dueñas, L. F., & Muriel Ortiz, J. G. (n.d.). *Propuesta elaboración de una guía para el proceso de diseño en proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú.*
- Marín Montoya, J. P., & Correa Ramírez, J. C. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua angustifolia Kunth.*
- MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis.*
- Medio, T., & Teoría, A. Y. (1972). *Tema 1. medio ambiente y teoría de sistemas.* 1. 1–14.
- Mena Cabrera, P. A. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San Fernando, Mu.* Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Mendonca, S. R. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización: Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. In *Sistemas de lagunas de estabilización: como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadio* (p. 370).
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). *Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.* *El Peruano*, 11.
- Ministerio del Ambiente “MAE.” (2013). *Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales. Manual Para Municipios Ecoeficientes*, 511, 179.
- Moposita Chiluzza, A. D. (2015). *Determinación de coliformes fecales en el agua de consumo humano y su relación con enfermedades diarreicas agudas en los hogares de la parroquia de pasa del cantón Ambato en el período diciembre 2014-mayo 2015.* Universidad Técnica de Ambato-Facultad de Ciencias de la Salud-Carrera Medicina.

- Moreno Mogollón, J. R., & Rangel Plata, J. T. (2018). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal prototipo plantado con sistema vetiver para el tratamiento de aguas residuales en una vivienda rural en el municipio de Floridablanca.*
- Muñoz, A. H., Lehmann, A. H., & Martínez, P. G. (1995). *Manual de depuración Uralita: Programa de diseño y cálculo de depuradoras.* Paraninfo.
- Naranjo Ríos, N. Y. (2017). *Estudio para mejorar la eliminación de fósforo en humedales artificiales empleando fangos generados en la potabilización del agua, mediante procesos de adsorción. Aplicación a la potabilizadora La Presa (Manises, Valencia).*
- Ñaupas, H., Mehía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación Cuantitativa-cualitativa y redacción de la Tesis* (Ediciones de la U (ed.); 4 Edición).
- OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales.* https://doi.org/https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- PARRAO LÓPEZ, L. A. (2018). *Diseño y Construcción de un Prototipo de Humedal Artificial de Flujo Subssuperficial para el Tratamiento de aguas Residuales Domésticas.*
- Paucar, F., & Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. *South Sustainability*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-004>
- Reynolds, K. (2002). *Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica.[En línea].[mayo 2009].*
- Rojas Díaz, M. Y. (2018). *Tratamiento de aguas residuales domésticas con la especie vetiver (Chrysopogon zizanioides) en humedales artificiales en la comunidad de Santa Rosa bajo, distrito Chota, 2017.*
- Rossi, M., Ortega, R., & Soto, J. (2010). Oportunidades de mejoras ambientales por el tratamiento de aguas residuales en el Perú. *Fondo Nacional Del Ambiente-Perú, Diciembre Del.*

- Ryder, G. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017: Aguas residuales: el recurso no explotado*. UNESCO.
- Saavedra Castillo, B. A. (2017). *Aplicación de macrofitas en flotación como ayuda en el tratamiento de aguas residuales en la laguna UDEP*.
- Santana Suárez, X. V., & Santos Tello, J. D. (2016). *Eficiencia del pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) ex-situ en la remoción de contaminantes orgánicos, caso de estudio río muerto, cantón Manta*. Calceta: Espam.
- Saravanane, R., & Murthy, D. V. S. (2000). Application of anaerobic fluidized bed reactors in wastewater treatment: a review. *Environmental Management and Health*, 11(2), 97–117. <https://doi.org/10.1108/09566160010321424/FULL/HTML>
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55–63.
- Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Introduction. *Vertical Flow Constructed Wetlands*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404612-2.00001-5>
- Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica*. Editorial Limusa.
- Torres Callupe, G. M. (2018). *Humedal artificial con la especie Typha dominguensis para el tratamiento de aguas grises domésticas, AA. HH. San Benito–Carabayllo, 2017*.
- Vanegas Gómez, E. V. (n.d.). *Eficiencia del Jacinto de Agua (Eichhornia Crassipes) en la Fitodepuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)*.
- Varjani, S., Pandey, A., Tyagi, R. D., Ngo, H. H., & Larroche, C. (2020). *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Emerging Organic Micro-Pollutants*. Elsevier.
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Humedales construidos: Diseño y operación*. Universidad de Concepción.

Vinueza Estévez, J. S. (2014). *Diseño de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas negras y grises del campo base y área de mantenimiento El Coca de la empresa TRIBOILGAS.*

ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 27

Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN	TECNICA	INSTRUMENTO
¿De qué manera evaluamos los componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima?	Evaluar las componentes de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.	Los componentes de operación del humedal subsuperficial tienen un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.	<i>Humedal artificial subsuperficial</i>	Los componentes del humedal artificial subsuperficial se evaluaron tomando en cuenta el cultivo de macrófitas y sustrato de acuerdo a las especies de Vetiver, Juncus y sustrato zeolita y Grava.	D.1 Cultivo de macrófitas	<i>Vetiver (Chrysopogon zizaniodes)</i>	---	Observacion Experimental	---
						<i>Juncus (juncus spp.)</i>	---		---
						<i>Zeolita</i>	---		---
						<i>Grava</i>	---		---
D.2 Sustrato									
PROBLEMAS ESPECÍFICO	OBJETIVOS ESPECÍFICO	HIPOTESIS ESPECÍFICO	VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN	TECNICA	INSTRUMENTO
P.1 ¿De qué medida el tipo de cultivo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial generará un tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima?	O.1 Determinar el efecto del tipo de cultivo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.	H.1 El tipo de cultivo de macrófitas como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tendrá un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.		El tratamiento de aguas residuales se evaluó tomando en cuenta los parámetros físicos, químicos y biológicos mediante la medición de conductividad, turbidez, pH, DQO, Coliformes totales y coliformes termotolerantes cuyos valores se registraron en una ficha de recolección de datos.	D.1 Parámetros físicos	<i>Conductividad</i>	uS/cm	Ficha de recolección de datos	Potenciómetro
						<i>Turbidez</i>	NTU		Multiparámetro
P.2 ¿De qué medida el tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial generará un tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima?	O.2 Determinar el efecto del tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.	H.2. El tipo de sustrato como componente de operación del humedal artificial subsuperficial tendrá un efecto significativo en el tratamiento de aguas residuales del distrito de Independencia, Lima.	<i>Tratamiento de agua residual</i>		D.2 Parámetros químicas	<i>pH</i>	Unidades		Multiparámetro
						<i>DQO</i>	mg/l		Digestor, colorímetro, oxidación de viales
						<i>Coliformes Totales</i>	NMP/100 ml		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Ed
					D.3 Parámetros biológicos	<i>Coliformes Termotolerantes</i>	NMP/100 ml		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 23rd Ed

ANEXO 2. INSTRUMENTOS VALIDADOS

A. INFORME DE ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-4553

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) ²	SMEWW-APHA AWWA-WEF Part 9221 F1, 23 rd Ed. 2017.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Escherichia coli test (EC-MUG Medium).
Coliformes Totales (NMP) ²	SMEWW 9221 B, 23 rd Ed. 2017	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.
pH ^{(*) (e)}	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 23 rd Ed. 2017	pH Value Electrometric Method
Demanda Bioquímica de Oxígeno ^(*)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23 rd Ed. 2017	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
Turbidez ^(*)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B 23rd Ed. 2017	Turbidity. Nephelometric Method.
Conductividad ^{(*) (e)}	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B 23rd Ed. 2017	Conductivity. Laboratory Method.
Demanda Química de Oxígeno ^(*)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23 rd Ed. 2017	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method
Temperatura ^{(*) (e)}	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B. 23rd Ed. 2017	Temperature. Laboratory and Field Methods

*SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

^(e) Ensayo realizado en campo (medido in situ)

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-4553

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-22-13785
CÓDIGO DEL CLIENTE:				M-1(S)
COORDENADAS:				E:0277325
UTM WGS 84:				N:8675914
PRODUCTO:				Agua Residual
SUB PRODUCTO:				Agua Residual Industrial
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				I-OPe-1.5 MUESTREO DE AGUA RESIDUAL
FECHA y HORA DE MUESTREO :				29-03-2022 08:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) ²	NMP/100mL	NA	1,8	1 100 000,0
Coliformes Totales (NMP) ²	NMP/100mL	NA	1,8	1 100 000,0
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	1 130,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	<2,0
pH (*)	Unidad de pH	NA	0,01	7,21
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	15,10
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	73,5
Temperatura (*)	(°C)	NA	0,1	26,2

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

NA: No Aplica

"FIN DE DOCUMENTO"

B. INFORME DE ENSAYO DE PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-6951

N° Id.: 0000050628

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 23rd Ed. 2017.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E.coli.
Coliformes Totales (NMP) (*)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 23rd Ed. 2017.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.

*SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-6951

N° Id.: 0000050628

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-21822	M-22-21823	M-22-21824	M-22-21825			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	ZEO+VET-1	ZEO+VET-2	ZEO+JUN1	ZEO+JUN2			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	05-05-2022 13:10	05-05-2022 13:20	05-05-2022 13:30	05-05-2022 13:40			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	17,0	14,0	240,0	17,0
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	920,0	350,0	16 000,0	920,0

*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-6951

N° Id.: 0000050628

ITEM	5	6	7	8			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-21826	M-22-21827	M-22-21828	M-22-21829			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	GRAY+VET-1	GRAY+VET-2	GRAY+JUN1	GRAY+JUN2			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual			
SUB PRODUCTO:	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal	Agua Residual Municipal			
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
FECHA y HORA DE MUESTREO :	05-05-2022 13:50	05-05-2022 14:00	05-05-2022 14:10	05-05-2022 14:20			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	23,0	540,0	9,2	11,0
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	240,0	1 400,0	350,0	170,0

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Código Interno seguridad : 0000050628

"FIN DE DOCUMENTO"

ANEXO 3. DATOS DE TOMA DE MUESTRAS

N° de corrida	Tratamientos	Replica	7/04/2022										
			pH			Conductividad			Turbidez			DQO	
			Unidades			uS/cm			NTU			mg/l	
			R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	Prom
1	Zeolita + Vetiver	R1	7.323	7.88	7.60	6.44	5.62	6.03	35.28	34.63	34.96	70	70
2	Zeolita + Vetiver	R2	7.213	7.88	7.55	5.62	5.58	5.60	37.75	34.02	35.89	78	78
3	Zeolita + Junco	R1	7.2	7.77	7.49	6.07	6.6	6.33	44.02	36.54	40.28	162	162
4	Zeolita + Junco	R2	7.183	7.86	7.52	6.69	5.64	6.16	45.57	35.94	40.76	155	155
5	Grava + Vetiver	R1	8.087	6.07	7.08	6.49	6.53	6.51	39.7	38.8	39.25	91	91
6	Grava + Vetiver	R2	8.223	5.84	7.03	5.90	5.54	5.72	41.05	44.78	42.92	96	96
7	Grava + Junco	R1	8.333	7.04	7.69	5.98	6.76	6.37	57.44	44.75	51.1	183	183
8	Grava + Junco	R2	8.173	5.79	6.98	5.84	5.57	5.71	48.48	43.87	46.18	115	115

N° de corrida	Tratamientos	Replica	21/04/2022										
			pH			Conductividad			Turbidez			DQO	
			Unidades			uS/cm			NTU			mg/l	
			R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	Prom
1	Zeolita + Vetiver	R1	7.75	7.84	7.795	3.97	4.01	3.99	24.98	31.98	28.48	32	32
2	Zeolita + Vetiver	R2	7.65	7.92	7.785	3.97	3.98	3.975	26.68	22.16	24.42	48	48
3	Zeolita + Junco	R1	7.43	7.87	7.65	3.9	3.97	3.935	16.43	17.52	16.98	8	8
4	Zeolita + Junco	R2	7.65	7.92	7.785	3.87	3.89	3.88	27.42	21.66	24.54	14	14
5	Grava + Vetiver	R1	6.79	7.02	6.905	4.68	4.62	4.65	4.82	37.3	21.06	70	70
6	Grava + Vetiver	R2	6.91	6.9	6.905	4.42	4.63	4.525	25.03	26.16	25.6	86	86
7	Grava + Junco	R1	6.7	6.94	6.82	3.9	3.92	3.91	49.78	56.13	52.96	140	140
8	Grava + Junco	R2	6.72	6.64	6.68	4.57	4.64	4.605	45.36	39.15	42.26	120	120

N° de corrida	Tratamientos	Replica	5/05/2022											
			pH			Conductividad			Turbidez			DQO		
			Unidades			uS/cm			NTU			mg/l		
			R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	R2	Prom	R1	Prom	
1	Zeolita + Vetiver	R1	6.75	6.77	6.76	3.71	3.7	3.705	6.75	6.77	6.76	49	49	
2	Zeolita + Vetiver	R2	8.63	8.64	8.635	2	3.4	2.7	8.63	8.64	8.635	59	59	
3	Zeolita + Junco	R1	8.31	8.44	8.375	3.8	3.75	3.775	8.31	8.44	8.375	12	12	
4	Zeolita + Junco	R2	8.41	8.37	8.39	4.08	4.1	4.09	8.41	8.37	8.39	13	13	
5	Grava + Vetiver	R1	8.2	8.26	8.23	4.96	4.91	4.935	38.22	42.29	40.26	65	65	
6	Grava + Vetiver	R2	8.58	8.44	8.51	4.84	4.86	4.85	28.58	38.44	33.51	70	70	
7	Grava + Junco	R1	8.35	8.39	8.37	5.05	5.09	5.07	34.35	38.39	36.37	138	138	
8	Grava + Junco	R2	8.21	8.2	8.205	4.63	4.64	4.635	48.21	48.62	48.42	115	115	

ANEXO 4. FOTOS DEL EXPERIMENTO EN EL LABORATORIO

Foto 1. Vista de la PTAR de la Municipalidad de Independencia



Foto 2. Monitoreo para la caracterización del agua residual de la PTAR de la municipalidad de Independencia, a cargo de un laboratorio externo.



Foto 3. Medición de parámetros in situ del agua residual de la PTAR de la municipalidad de Independencia.



Foto 4. Almacenamiento de las muestras de agua residual, para su posterior análisis por un laboratorio externo.



Foto 5. Recolección de la especie vetiver en los Pantanos de Villa, Chorrillos.



Foto 6. Adición del sustrato zeolita al humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.



Foto 7. Medición de la conductividad y del pH.



Foto 8. Adición del ácido sulfuro en las muestras del agua residual, para poder medir la DQO.



Foto 9. Rotulación de viales para medición de DQO



Foto 10. Reposo de las muestras del agua residual.



Foto 11. Vista del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal con el sustrato zeolita y las especies vetiver y junco.



Foto 12. Vista del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal con el sustrato grava y la especie junco.

