

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales
artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno,
Ayacucho - 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:
Bach. Roy Roger ROBLES QUICANA

ASESORA:
Mtra. Norma GARCÍA TUCTA

AYACUCHO - PERÚ
2025

Dedicatoria

A Dios

Agradezco profundamente a Dios por regalarme la vida, por brindarme sabiduría, salud y fortaleza en los momentos más exigentes de esta etapa. Gracias por la bendición de seguir estudiando y de mantenerme firme en mi propósito profesional.

A mis Padres

A mis queridos padres, por su esfuerzo constante, dedicación y amor incondicional, me han dado la oportunidad de continuar mi formación profesional. Gracias por estar siempre presentes, por motivarme a seguir adelante, por comprender mis silencios y acompañarme en cada paso. Este logro también es de ustedes.

A mi hija

A mi hija, Helen Valentina, quien es mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Deja que este logro te sirva de motivación para creer en ti mismo en el tiempo, perseverar ante las adversidades y alcanzar cada una de tus metas y objetivos. Todos mis esfuerzos están dedicados a ti, con infinito amor.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en especial a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por brindarme la formación académica y las condiciones necesarias para alcanzar mis metas profesionales.

A mis padres, hermanos, tíos y amigos por su respaldo incondicional y su acompañamiento a lo largo de mi proceso de formación profesional; en especial a mi tío Rebelino, por su apoyo constante, y a mi compañero y amigo Brayan Ortiz, así como a mi amigo Hiroshi, por la ayuda brindada.

Agradezco al Ing. David Alarcón, miembro del jurado evaluador, por sus valiosas enseñanzas durante mi etapa académica. Sus aportes, realizados en diversas oportunidades, permitieron mejorar la calidad del trabajo y fortalecer mi aprendizaje académico.

Finalmente expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesora Ing. Norma García Tucta por su valiosa orientación, apoyo constante y aporte académico durante el desarrollo de este estudio. Agradezco también a los miembros del jurado por sus observaciones, voluntad y determinación, que han contribuido significativamente a la consolidación y realización del presente estudio.

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Lista de tablas	vii
Lista de Figuras	viii
Resumen	x
Abstract	xi
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO	14
1.1. ANTECEDENTES	14
1.1.1. A nivel mundial	14
1.1.2. A nivel nacional.....	15
1.1.3. A nivel local	15
1.2. BASES TEÓRICAS	16
1.2.1. Humedales artificiales	16
1.3. MARCO NORMATIVO	34
CAPITULO II. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	37
2.1. ASPECTOS GENERALES	37
2.1.1. Área de estudio	37
2.1.2. Ubicación política.....	40
2.1.3. Ubicación geográfica.....	40
2.1.4. Limites.....	40
2.1.5. Vía de acceso	40
2.2. MATERIALES Y EQUIPOS	41
2.2.1. Materiales y equipos en campo	41
2.2.2. Materiales y equipos en oficina	42
2.2.3. Programas de Ingeniería	42

2.3. METODOLOGÍA	43
2.3.1. Reconocimiento del área de estudio	43
2.3.2. Análisis del punto de intervención	52
2.3.3. Criterio de diseño	55
2.3.4. Diseño hidráulico.....	60
2.3.5. Construcción del humedal artificial.....	71
2.3.6. Toma de muestras y análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.....	73
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
3.1. Resultados.....	81
3.1.1. Evaluar la reducción de DBO, DQO y OD en las aguas residuales, aplicando humedales artificiales con <i>Canna tuerckheimii</i> y <i>Phragmites australis</i>	81
3.1.2. Determinar la eficiencia de los humedales artificiales con <i>Canna tuerckheimii</i> y <i>Phragmites australis</i> en la disminución de sólidos suspendidos totales (SST)	85
3.1.3. Evaluar el efecto del uso de humedales artificiales con <i>Canna tuerckheimii</i> y <i>Phragmites australis</i> en la reducción de coliformes fecales	87
3.2. Discusiones	91
3.2.1. Discusión de resultados basada en la literatura científica	91
3.2.2. Discusión de resultados según el D.S. N.º 003-2010-MINAM	93
3.2.3. Discusión del oxígeno disuelto.....	94
3.2.4. Discusión según límites referenciales de calidad de efluentes en Perú	95
3.2.5. Discusión según la Norma Técnica OS.090 – DIGESA	95
3.2.6. Discusión según el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua – D.S. N.º 004-2017-MINAM	96
CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
4.1. Conclusiones.....	98
4.2. Recomendaciones	100

Referencias bibliográficas.....	102
Lista de abreviaturas.....	107
Glosario	108
Anexos.....	109
8.1. Panel fotográfico.....	110
8.2. Cálculos del humedal.....	119
8.2.1. Aforo.....	119
8.2.2. Humedal subsuperficial	119

Lista de tablas

Tabla 1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) - Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	35
Tabla 2. Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR.	35
Tabla 3. Selección de los procesos de tratamiento de las aguas residuales.....	36
Tabla 4. Vías de acceso al punto de investigación	41
Tabla 5. Carga superficial para humedales de flujo superficial y subsuperficial	55
Tabla 6. Coeficiente de velocidad de reacción de la DBO	57
Tabla 7. Parámetro de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial	58
Tabla 8. Parámetro de riego de vegetales y bebida de animales	59
Tabla 9. Variables de diseño para el dimensionamiento del humedal artificial	67
Tabla 10. Dimensionamiento del humedal artificial de acuerdo a los parámetros de diseño requeridos.....	67
Tabla 11.	74
Tabla 12. Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el pre-tratamiento.....	75
Tabla 13. Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el postratamiento	77

Lista de Figuras

Figura 1. Representación de una humedad de flujo superficial.....	18
Figura 2. Humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial	19
Figura 3. <i>Procesos y mecanismos de remoción que ocurren en los H.A.</i>	20
Figura 4. Representación de las plantas	30
Figura 5. Mapa de ubicación del área de estudio.	39
Figura 6. Imagen satelital del punto de investigación	43
Figura 7. Mapa de tipo de suelos del punto de intervención	46
Figura 8. Mapa de la Geomorfología del punto de intervención.....	47
Figura 9. Mapa de la Fisiografía del punto de investigación	48
Figura 10. Mapa de uso actual de los suelos en el punto de investigación	49
Figura 11. Mapa de la Capacidad de uso mayor del suelo en el punto de investigación	50
Figura 12. Contaminación en el río Alameda.....	51
Figura 13. Condiciones ambientales del punto de intervención.....	53
Figura 14. Aforamiento de caudal para el pre dimensionamiento.....	61
Figura 15. Toma de muestra de temperatura del agua.....	62
Figura 16. Diseño en perfil del humedal N° 1	69
Figura 17. Diseño en perfil del humedal N° 2.....	70
Figura 18. Diseño en planta del punto de muestreo.	70
Figura 19. Instalación del sistema de tuberías de salida en el humedal N° 1.....	72
Figura 20. Plantación de la semilla de nombre científico <i>Canna tuerckheimii</i>	73
Figura 21. Vista en planta de la geometría del humedal N °1	79
Figura 22. Vista en planta de la geometría del humedal N °2.....	80
Figura 23. Resultados de la Demanda Bioquímica (DBO ₅) en el pretratamiento y postratamiento	81
Figura 24. Resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el pretratamiento y postratamiento	83
Figura 25. Resultados de Oxígeno Disuelto (OD) en el pretratamiento y postratamiento	84
Figura 26. Resultados de la Sólidos suspendidos totales (SST) en el pretratamiento y postratamiento	86

Figura 27. Resultados de la Numeración de Coliformes Fecales en el pretratamiento y postratamiento	87
Figura 28. Resultados de la Numeración de Nitrógeno total en el pretratamiento y postratamiento	88
Figura 29. Resultados de Fósforo total en el pretratamiento y postratamiento.....	89
Figura 30. Resultados de la turbiedad en el pretratamiento y postratamiento.....	89
Figura 31. Resultados de conductividad eléctrica en el pretratamiento y postratamiento	90
Figura 32. Resultados del Ph en el pretratamiento y postratamiento	91

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua del río Alameda mediante la aplicación de humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, empleando las especies vegetales *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, en la comunidad de totora, distrito de Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, región Ayacucho. El área de estudio está ubicada en las coordenadas geográficas, latitud Sur 13°8'21" y longitud oeste 74°12'20" del meridiano Greenwich, a una altitud 2603.2 msnm.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo y diseño cuasiexperimental, considerando un análisis comparativo de la calidad del agua antes y después del tratamiento. Para la evaluación se realizaron muestreos de agua residual en etapas de pretratamiento y postratamiento, analizándose parámetros fisicoquímicos y microbiológicos como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total, nitrógeno total, oxígeno disuelto, conductividad, turbiedad y coliformes fecales, mediante ensayos de laboratorio acreditados.

Los resultados mostraron que la DQO disminuyó de 191 mg/L a 126.7 mg/L, mientras que los sólidos suspendidos totales se redujeron significativamente de 986 mg/L a 31.23 mg/L. En contraste, la DBO₅ no presentó reducción significativa, registrándose valores de 60.66 mg/L en el pretratamiento y 63.75 mg/L en el postratamiento. Asimismo, el fósforo total y el nitrógeno total se mantuvieron en concentraciones elevadas, mientras que los coliformes fecales superaron los límites permisibles. La relación DQO/DBO₅ fue mayor a 2.5.

Se concluye que el humedal artificial contribuyó parcialmente a la mejora de la calidad del agua, principalmente en la remoción de sólidos suspendidos y en la reducción de la DQO. Sin embargo, la DBO₅ no mostró una reducción significativa, registrando incluso un ligero incremento de 60.66 mg/L a 63.75 mg/L. Este resultado se atribuye a la influencia de las precipitaciones pluviales durante el período de evaluación, las cuales generaron un aumento en la carga orgánica afluente al sistema, alterando las condiciones normales de tratamiento.

Palabras claves: calidad del agua, humedales artificiales, parámetros fisicoquímicos, DQO, DBO₅.

Abstract

This research aimed to evaluate the water quality of the Alameda River through the application of subsurface horizontal flow constructed wetlands, using the plant species *Canna tuerckheimii* and *Phragmites australis*, in the district of Jesús Nazareno, province of Huamanga, Ayacucho region. The study area is located at 13°8'21" South latitude and 74°12'20" West longitude, at an altitude of 2603.2 meters above sea level.

The study was conducted using a quantitative, descriptive, and quasi-experimental design, including a comparative analysis of water quality before and after treatment. For the evaluation, wastewater samples were taken during pretreatment and post-treatment stages. Physicochemical and microbiological parameters such as Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Chemical Oxygen Demand (COD), total suspended solids (TSS), total phosphorus, total nitrogen, dissolved oxygen, conductivity, turbidity, and fecal coliforms were analyzed using accredited laboratory tests.

The results showed that COD decreased from 191 mg/L to 126.7 mg/L, while total suspended solids were significantly reduced from 986 mg/L to 31.23 mg/L. In contrast, BOD₅ did not show a significant reduction, registering values of 60.66 mg/L in the pretreatment and 63.75 mg/L in the posttreatment. Likewise, total phosphorus and total nitrogen remained at high concentrations, while fecal coliforms exceeded permissible limits. The COD/BOD₅ ratio was greater than 2.5.

It is concluded that the constructed wetland partially contributed to the improvement of water quality, mainly in the removal of suspended solids and the reduction of COD. However, BOD₅ did not show a significant reduction, even registering a slight increase from 60.66 mg/L to 63.75 mg/L. This result is attributed to the influence of rainfall during the evaluation period, which increased the organic load entering the system, altering normal treatment conditions.

Keywords: water quality, constructed wetlands, physicochemical parameters, COD, BOD₅.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales ha constituido un problema ambiental relevante, asociado al vertimiento de aguas residuales domésticas sin tratamiento adecuado, lo cual ha generado alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del recurso hídrico. Esta situación ha ocasionado impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y ha limitado los usos del agua en diversos ámbitos.

En el distrito de Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, región Ayacucho, el río Alameda ha sido receptor de descargas de aguas residuales, lo que ha contribuido a la disminución de la calidad del agua y a la presencia de contaminantes orgánicos, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. Dichas condiciones han representado un riesgo potencial para el entorno ambiental y la población cercana.

Ante esta problemática, los humedales artificiales han sido considerados como una alternativa de tratamiento sostenible, debido a su capacidad para remover contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan en el sustrato y la vegetación. Los humedales es una opción para el tratamiento de aguas residuales y constituyen una posibilidad de hábitat para especies locales y migratorias dadas las amenazas. (Montes Iturrizaga , 2023)

Estos sistemas han demostrado ser altamente eficientes en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos y los coliformes fecales, lo que evidencia su capacidad para mejorar significativamente la calidad del agua. La disminución de estos parámetros refleja la eliminación tanto de materia orgánica biodegradable como de compuestos contaminantes, así como la reducción de microorganismos patógenos.(Nava Rojas & Lango Reynoso, 2023)

En ese contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua del río Alameda mediante la aplicación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, utilizando las especies *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, con la finalidad de analizar la variación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después del tratamiento.

Para alcanzar los fines propuestos en esta investigación, se ha formulado el siguiente objetivo general:

Objetivo general

Determinar el grado de descontaminación que ejercen los humedales artificiales con las especies *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, sobre las aguas residuales vertidas por la PTAR Totorilla, en el margen izquierdo del río Alameda.

Objetivo específico

- Evaluar la reducción de DBO, DQO y OD en las aguas residuales, aplicando humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, en un tramo de 100 metros aguas abajo de la PTAR Totorilla.
- Determinar la eficiencia de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la disminución de sólidos suspendidos totales (SST), dentro del mismo tramo del cauce del río Alameda.
- Evaluar el efecto del uso de humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la reducción de coliformes fecales, en un tramo de 100 metros aguas abajo, en el margen izquierdo del río Alameda.

CAPITULO I.

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. A nivel mundial

Romero Ferriol (2022) realizó un análisis comparativo de distintos tipos de humedales construidos aplicados al tratamiento de aguas domésticas en España, enfatizando que la selección de especies vegetales adecuadas es crucial para mantener una elevada eficiencia de remoción. Encontró que los humedales de flujo superficial poseen una ventaja significativa en la reducción de microorganismos patógenos gracias a la exposición solar y los procesos foto oxidativos. Además, su estudio resalta la necesidad de integrar estos sistemas en planes de gestión urbana debido a sus beneficios ecológicos, paisajísticos y educativos.

Veloz Romero (2024) realizó un estudio sobre la eliminación de nitratos en humedales artificiales de la Albufera, en Valencia (España), con el objetivo de analizar su influencia en las concentraciones y transformaciones del nitrógeno en el agua. Para ello, evaluó variables como la temperatura, el oxígeno disuelto y el flujo hídrico en diferentes puntos del sistema. Los resultados evidenciaron que estos humedales son efectivos en la reducción de nitratos, especialmente en otoño y primavera, y que su eficiencia depende de factores ambientales como la temperatura y el caudal. Asimismo, se concluye que, aunque estos sistemas contribuyen significativamente a la mitigación de la contaminación por nitrógeno, es necesario optimizar su diseño y gestión para maximizar sus beneficios ambientales.

Morales et al. (2013) realizaron un estudio sobre el uso de humedales construidos con plantas para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes en aguas residuales, destacando tanto su potencial como sus limitaciones. Los autores explican que, durante décadas, la mayoría de investigaciones se centraron en especies tradicionales como *Phragmites australis*, *Typha latifolia* o *Schoenoplectus* spp., las cuales demostraron ser eficaces para remover materia orgánica y nutrientes, pero carecían de valor estético y, en muchos casos, dificultaban la integración paisajística de los sistemas en zonas urbanas o semirurales. Ante esta brecha, señalan que estudios previos habían empezado a explorar el uso de plantas ornamentales, revelando que especies como *Canna indica*, *Zantedeschia aethiopica* o *Iris pseudacorus* podían alcanzar eficiencias de remoción comparables e

incluso superiores a las plantas convencionales, logrando reducciones de DBO entre 70 % y 93 %, de nitrógeno total entre 45 % y 73 % y de fósforo entre 40 % y 80 %.

1.1.2. A nivel nacional

Pacheco Román & Carhuaricra Solorzano (2025) analizaron la eficiencia de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de aguas residuales grises en el distrito de Vegueta, mediante un enfoque cuantitativo y un diseño preexperimental. El estudio consistió en la implementación de un sistema con *Typha domingensis*, evaluando la calidad del agua en diferentes etapas del proceso. Los resultados evidenciaron una alta eficiencia en la remoción de contaminantes, destacando reducciones significativas en parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitratos y fósforo total. Asimismo, otros indicadores de calidad del agua se mantuvieron dentro de los rangos permitidos. En conclusión, el sistema demostró ser una alternativa efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales grises, especialmente en contextos domésticos.

Inga Armas et al., (2024) evaluaron humedales artificiales con *Typha domingensis* (totora), algunos mejorados con rizo bacterias, para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La investigación tuvo como objetivo determinar la capacidad de estos sistemas para reducir la materia orgánica y los sólidos suspendidos. En el sistema sin rizo bacterias, lograron eficiencias de remoción de 77,27 % en DQO, 76,93 % en DBO₅ y 85,83 % en sólidos suspendidos totales (SST), reduciendo estas concentraciones muy cerca de los límites máximos permisibles. Con la adición de rizo bacterias, la eliminación fue aún mayor: 96,68 % para DQO, 96,67 % para DBO₅ y 94,88 % para SST, lo que demuestra el gran impacto que tienen los microorganismos en la rizosfera para mejorar la depuración.

1.1.3. A nivel local

Huamani Gutiérrez (2022) evaluó la influencia fitorremediadora de las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Salvinia natans* en el tratamiento de aguas residuales municipales en la ciudad de Ayacucho. El estudio tuvo como objetivo determinar la eficiencia de remoción de contaminantes y comparar la capacidad depuradora de ambas especies. Los resultados evidenciaron que *Eichhornia crassipes* presentó mayores porcentajes de remoción en comparación con *Salvinia natans*, destacando reducciones de aceites y grasas (84,5%), demanda bioquímica de oxígeno (59,1%), demanda química de oxígeno (59,1%) y sólidos suspendidos totales (79,7%). En contraste, *Salvinia natans* mostró eficiencias

menores en los mismos parámetros. En conclusión, se determinó que *Eichhornia crassipes* posee una mayor capacidad fitorremediadora, constituyéndose como una alternativa más eficiente para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Cárdenas Llanccce (2019) realizó una evaluación de la calidad del agua del río Savia, fuente de abastecimiento para consumo humano en el distrito de Canayre (Ayacucho), con el objetivo de determinar su aptitud para uso potable. A partir de análisis fisicoquímicos y microbiológicos, el estudio reportó un Índice de Calidad del Agua (ICA-PE) de 36,72, clasificado como “malo”, evidenciando un riesgo significativo para la salud de la población. Asimismo, se identificaron altas concentraciones de coliformes fecales y totales, así como la presencia de metales por encima de los límites permisibles. El autor atribuye estos resultados tanto a factores naturales como a actividades antrópicas, como el manejo inadecuado de las fuentes y la ausencia de tratamiento. En conclusión, se establece la necesidad de implementar tratamientos avanzados del agua y estrategias de gestión local, resaltando la importancia de este tipo de estudios como base para intervenciones en contextos rurales con limitado acceso a saneamiento.

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Humedales artificiales

Los humedales construidos son sistemas de tratamiento creados por humanos que buscan emular, mejorar y gestionar los procesos de purificación propios de los humedales naturales. Estos sistemas integran métodos físicos, como la sedimentación y la filtración a través de lechos de arena o grava, junto a procesos químicos, que incluyen la absorción de metales y nutrientes en el sustrato. Además, se involucran procesos biológicos facilitados por microorganismos y plantas acuáticas, que ayudan en la descomposición de materia orgánica y en la conversión de compuestos que contienen nitrógeno. Estos sistemas pueden funcionar a través de flujo superficial o subterráneo y están diseñados para maximizar la oxigenación, la retención de agua y la interacción entre el agua, el sustrato y la vegetación. De esta manera, se eliminan compuestos como DBO, DQO, nutrientes, sólidos suspendidos y patógenos utilizando mecanismos como la nitrificación y desnitrificación, la fitoextracción y la fitodepuración. (Neira Huacchillo, 2020)

Además de su rol como purificadores, los humedales construidos ofrecen beneficios ecológicos adicionales, como la creación de hábitats para la fauna silvestre, el aumento de la biodiversidad local, el control de microclimas, la mejora paisajística y la reducción

de costos operativos en comparación con tratamientos mecánicos. Gracias a esta combinación de eficacia en la depuración, sostenibilidad y múltiples funciones ecológicas, los humedales construidos son vistos como una opción altamente apropiada para áreas urbanas y rurales con recursos tecnológicos limitados.(Neira Huacchillo, 2020)

1.2.1.1. Tratamiento de aguas residuales por humedal artificial

Nos menciona que los humedales construidos son una alternativa eficiente y económica para tratar aguas residuales en zonas rurales, ya que requieren poco mantenimiento y pueden eliminar hasta el 95 % de la materia orgánica y el 60 % de los nutrientes.

Las aguas residuales contienen altos niveles de contaminantes como sólidos suspendidos totales, nutrientes (nitrógeno y fósforo), compuestos químicos tóxicos y microorganismos patógenos, los cuales pueden generar procesos de eutrofización y riesgos para la salud humana, por lo que su tratamiento es fundamental para evitar la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. (Marín Acosta & Solís Silvan, 2016)

A. El humedal artificial está constituido de:

- Plantas acuáticas: *Phragmites australis* o caña gigante, planta de juncos.
- Material filtrante: piedra chancada
- tubería plástica, conectores angulares de PVC
- Estanque o bolsa de contención.

B. Ventajas de los humedales artificiales

Al respecto la ONU-HABITAT (2008), indicaron lo siguiente:

- Costo reducido frente a sistemas convencionales de purificación.
- Capacidad para procesar de diversas sustancias de contaminantes
- Fácil de construir utilizando recursos locales.
- Manejo y mantenimiento de bajo esfuerzo
- Económicamente sostenible
- Proceso confiable y consistente

C. Limitaciones de los humedales artificiales

Al respecto la ONU-HABITAT (2008), indicaron lo siguiente:

- Requieren un área extensa para su implementación
- El rendimiento depende del diseño específico del sistema

- Los cambios estacionales pueden afectar su desempeño debido a la naturaleza del sistema
- Restricciones en el control de los procesos de purificación
- todavía se requieren estándares de diseño específicos para distintos tipos de efluentes y climas.

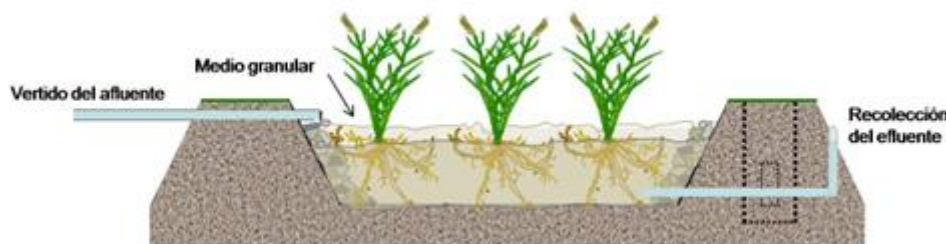
1.2.1.2. Tipos de humedales artificiales

- *Humedales de flujo superficial (HFS)*

Los humedales de flujo superficial consisten en sistemas de tratamiento donde las aguas residuales fluyen sobre la parte superior del sustrato, generando capas de agua que se asemejan a pantanos o marismas naturales. En este tipo de ecosistemas, el tratamiento del agua se lleva a cabo a través de una combinación de métodos físicos, como la sedimentación de partículas suspendidas y la filtración mediante la vegetación que emerge, además de procesos biológicos, en los que microorganismos que se adhieren a las raíces y tallos de las macrófitas descomponen materia orgánica y transforman compuestos nitrogenados. Asimismo, la exposición directa a la luz solar favorece la fotosíntesis de las plantas, lo que incrementa la cantidad de oxígeno en la columna de agua y favorece la biodegradación con oxígeno. (Blázquez, 2016)

Figura 1.

Representación de una humedad de flujo superficial



Fuente: Morel y Diener (2006) citado por Hoffman et al. (2011)

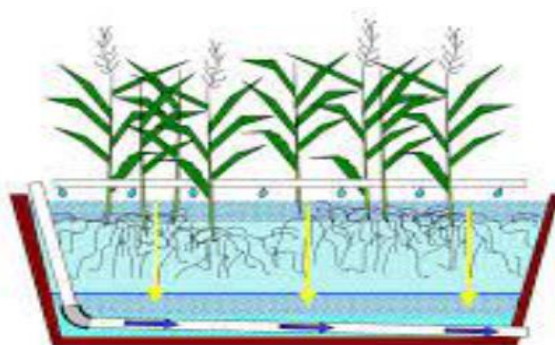
- *Humedales de flujo horizontal subsuperficial (fh)*

Los humedales artificiales están diseñados para tratar las aguas residuales como humedales naturales. Una de sus principales ventajas es que, como parte de un sistema creado por el hombre, no están sujetos a las restricciones ambientales asociadas con la liberación de agua en ecosistemas naturales, lo que los hace ideales para un uso controlado. (Londoño Cardona & Vanegas Carolina, 2009)

Estos sistemas cuentan con bases impermeables que impiden la penetración en el suelo. Se coloca material de sustrato como grava, arena o tierra encima de este sustrato para proporcionar un sustrato para el crecimiento de las plantas. Además de estabilizar el sistema, estas plantas son elementos clave en el proceso de purificación ya que ayudan a eliminar contaminantes a través de mecanismos biológicos y físicos. (Londoño Cardona & Vanegas Carolina, 2009)

Figura 2.

Humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial



Fuente: La imagen se obtuvo de la tesis “Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales contruidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitos”

- Humedales híbridos

Los humedales híbridos son sistemas de purificación que unen, de forma secuencial, distintas configuraciones de humedales artificiales con el propósito de aumentar la eficacia depurativa al aprovechar las particularidades de cada tipo. Esta modalidad combinada facilita que los procesos físicos, químicos y biológicos se lleven a cabo de modo más completo y equilibrado, ya que cada componente del sistema se enfoca en un tipo específico de contaminante o condición hidráulica. Por ejemplo, un humedal de flujo superficial puede situarse al inicio para ayudar en la sedimentación de partículas y la estabilización inicial del efluente, mientras que un humedal de flujo subsuperficial horizontal recibe luego el agua que ha sido tratada previamente y mejora la eliminación de DBO, DQO y nutrientes gracias a la actividad microbiana y la filtración del sustrato. Para finalizar, un humedal de flujo subsuperficial vertical puede reforzar la purificación al ofrecer una mayor oxigenación natural, lo que favorece los procesos aeróbicos avanzados y colabora de manera efectiva en la reducción de patógenos y compuestos de nitrógeno. (Rabat Blázquez, 2016)

- **Contaminantes removidos en un humedal**

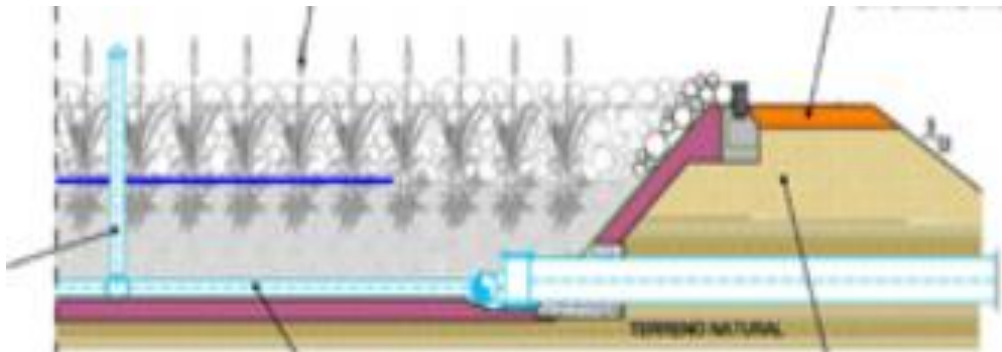
- Partículas suspendidas
- Compuestos orgánicos biodegradables
- Elementos nitrogenados
- Elementos Fosforados
- Agentes microbianos dañinos
- Contaminantes metálicos

1.2.1.3. Mecanismos y rendimientos en la eliminación de contaminantes.

En un humedal artificial se desarrolla diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Un amplio rango de procesos biológicos, físicos y químicos tienen lugar, por lo tanto, la influencia e interacción de cada componente involucrado es bastante compleja. (Delgadillo et al., 2010)

Figura 3.

Procesos y mecanismos de remoción que ocurren en los H.A



Fuente: Sistema de depuración por David Nuevo, Ingeniería de aguas

1.2.1.4. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Según (Baca Neglia, 2012), la separación del líquido de los demás componentes es indeseable en el tratamiento de aguas residuales, debido a que dichos constituyentes forman parte fundamental del proceso. En este contexto, el tratamiento se basa en la aplicación de procesos físicos, biológicos y químicos, los cuales integran el sistema de tratamiento.

Las aguas residuales son el resultado del uso del agua en actividades humanas y de la incorporación de sustancias que modifican su calidad original, contiene una mezcla de materiales disueltos y suspendidos. En forma general incluye aportes de origen

doméstico, comercial, institucional y, en ciertos casos, industrial; sin embargo, la naturaleza del efluente depende de las actividades específicas del generador y de la presencia o ausencia de descargas no domésticas. (Panza Panza & Rivera Medina, 2026)

1.2.1.5. Uso de aguas residuales en la agricultura.

La aplicación de aguas residuales en la agricultura implica utilizar el agua proveniente de áreas urbanas como un recurso para el riego, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde el agua dulce escasea. Estas aguas pueden aportar nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica que ayudan a mejorar la fertilidad del suelo, aumentan la actividad de microorganismos y favorecen la disponibilidad de nutrientes cruciales para las plantaciones, convirtiéndolas en una opción productiva y ecológicamente valiosa en zonas con falta de agua. No obstante, los autores señalan que el empleo de aguas residuales sin un tratamiento adecuado puede conllevar riesgos debido a la acumulación de sales, metales pesados y patógenos, lo que podría perjudicar la calidad del suelo y poner en peligro la salud humana; por ende, es fundamental analizar la calidad del efluente previo a su utilización en la agricultura para optimizar los beneficios y reducir cualquier efecto adverso. (Ramón Zamora et al., 2009)

1.2.1.6. Riego con aguas residuales tratadas.

El uso de aguas residuales tratadas para riego implica aprovechar efluentes que han sido sometidos a procesos de purificación, como lagunas de oxidación o métodos biológicos, con el objetivo de disminuir su nivel de contaminación antes de ser utilizados en agricultura, garantizando así una calidad adecuada para el riego. La depuración previa disminuye la presencia de patógenos, DBO, DQO y sólidos, lo que permite que el agua se utilice de forma segura en cultivos que reciben riego continuo o intermitente. Esto no solo mejora el suministro de agua, sino que también aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo y estimula la actividad microbiana, elementos esenciales para conservar o aumentar la fertilidad del suelo. Sin embargo, los autores señalan que, a pesar del tratamiento, pueden seguir existiendo riesgos de salinización y acumulación de sulfatos o metales pesados, por lo que es crucial realizar un monitoreo constante del agua y del suelo para asegurar un uso agrícola seguro y sostenible. (Ramón Zamora et al., 2009)

1.2.1.7. Procesos de remoción de contaminantes.

Los métodos para eliminar contaminantes en los humedales artificiales de flujo subterráneo se llevan a cabo a través de una combinación intrincada de procesos físicos, químicos y biológicos que operan al mismo tiempo en el medio granular y en las raíces de las macrófitas. Entre los métodos físicos se destacan la sedimentación y la filtración, que son las encargadas de atrapar partículas en suspensión y promover la claridad del agua. En el aspecto químico, la adsorción en el sustrato y las raíces, la precipitación de fosfatos y metales, así como los intercambios iónicos juegan un papel crucial en la disminución de nutrientes y sustancias inorgánicas. Desde un punto de vista biológico, la estructura del humedal favorece el crecimiento de biopelículas y poblaciones microbianas que realizan la biodegradación tanto aeróbica como anaeróbica de la materia orgánica, además de procesos adicionales como nitrificación, desnitrificación y la transformación de contaminantes difíciles de descomponer. La colaboración entre estos procesos, impulsada por los gradientes de oxígeno generados por las plantas, permite lograr altos estándares de purificación y estabilidad funcional, incluso ante cambios en la calidad del efluente. (Nava Rojas et al., 2023)

1.2.1.8. Consideraciones de construcción del humedal

Según (ARIAS I., 2005), para la construcción de humedales artificiales es necesaria la impermeabilización del suelo, la colocación del medio granular, el establecimiento de la vegetación y la incorporación de estructuras de entrada y salida, pudiendo incluirse sistemas de bombeo en función de los niveles de oxígeno disuelto. Estos sistemas eliminan contaminantes mediante procesos naturales físicos, químicos y biológicos.

- *Diseño y dimensiones del humedal.*

El modo en que se confecciona y la medida de un humedal artificial de flujo superficial y subsuperficial son aspectos clave para garantizar su eficacia en la depuración, dado que afectan directamente el tiempo de retención del agua, la manera en que fluye y cómo interactúa con el sustrato, las raíces y las comunidades de microorganismos. El diseño debería tomar en cuenta de manera equilibrada la longitud, el ancho y la profundidad, favoreciendo las configuraciones alargadas que permiten un flujo que se asemeje al pistón y previenen la creación de cortocircuitos hidráulicos. Generalmente, la profundidad se mantiene en niveles bajos que propician condiciones redox adecuadas y fomentan el desarrollo óptimo de las macrófitas. Además, la elección del medio granular

habitualmente grava de diámetros homogéneos es fundamental para facilitar la percolación, ampliar la superficie de adsorción y sostener las biopelículas que son responsables de la descomposición de contaminantes. Un diseño eficaz debe asegurar un flujo constante, un contacto adecuado en el tiempo y una aireación correcta de las raíces, factores que en conjunto definen la capacidad del sistema para eliminar materia orgánica, nutrientes y patógenos. (Serrano García & Corzo Hernández, 2008)

1.2.1.9. Maduración biológica del humedal

Los sistemas de humedales artificiales requieren un período de maduración biológica para alcanzar su máxima eficiencia de tratamiento. Durante las primeras semanas de operación, la comunidad microbiana del sustrato filtrante se encuentra en proceso de colonización y adaptación, lo que limita la capacidad del sistema para degradar eficientemente la materia orgánica biodegradable. Los humedales de flujo subsuperficial necesitan entre 2 y 6 meses de operación continua para que la biomasa microbiana alcance su plena capacidad de degradación aerobia y anaerobia, período durante el cual los resultados de remoción pueden ser inferiores a los esperados en condiciones de operación estable (Wallace, 2009)

1.2.1.10. Efecto first flush

El efecto "first flush" o primer lavado es un fenómeno hidrológico que ocurre durante los primeros eventos de precipitación intensa, en el cual las aguas de escorrentía superficial movilizan y arrastran hacia los cuerpos receptores la mayor concentración de contaminantes acumulados en la cuenca durante el período seco. Este fenómeno genera incrementos puntuales y significativos en los valores de DBO₅, sólidos suspendidos, coliformes y otros parámetros de calidad del agua, independientemente del sistema de tratamiento instalado aguas abajo. La escorrentía generada durante los primeros 30 minutos de un evento de lluvia intensa puede contener entre el 50% y el 80% de la carga contaminante total del evento, lo que representa un factor de variabilidad importante en los muestreos de calidad de agua realizados durante o después de períodos de lluvia prolongada (Bannerman, 2007).

1.2.1.11. Definición de términos

- *Coliformes termo-tolerantes o fecales.*

Los coliformes termo-tolerantes, conocidos también como coliformes fecales, constituyen una categoría de bacterias coliformes que pueden crecer a altas temperaturas, típicamente entre 44 y 45 grados Celsius, lo que les distingue de otros coliformes presentes en el medio ambiente. Su aparición sugiere contaminación por excrementos de humanos o animales, por lo que se les considera un indicador microbiológico efectivo para medir el riesgo sanitario en aguas tanto naturales como residuales. *Escherichia coli* es uno de los más destacados, considerado el indicador más preciso de contaminación fecal reciente, ya que su hallazgo indica la posible presencia de patógenos, incluyendo virus, protozoos o bacterias entéricas que representan un peligro para la salud pública. (Centeno Soto & Quispe Crispin, 2021).

- *Remoción de DBO5*

Los compuestos del carbono juegan un papel crucial en muchos de los procesos naturales que ocurren en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. El principal método utilizado para medir la cantidad de carbono en estos sistemas es el Oxígeno Bioquímico, siendo la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) una medida del consumo de oxígeno por parte de los microorganismos durante los procesos de oxidación de la materia orgánica. Generalmente se aconseja utilizar una prueba de cinco días para medir las concentraciones de DBO, cuyo resultado se expresa como DBO5. La remoción de DBO5 indica una disminución en la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua, lo que refleja una menor demanda de oxígeno necesaria para su descomposición biológica. En los humedales artificiales, esta remoción se logra principalmente a través de los procesos de descomposición biológica que ocurren en la columna de agua y en el sustrato o cama de vegetación sumergida, donde los microorganismos adheridos a las raíces y al medio filtrante degradan la materia orgánica presente en el afluente. (Guardia Curasma & Ccente Inga, 2023)

- *Remoción de DQO*

La eliminación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) implica disminuir el total de materia orgánica tanto descomponible como no descomponible que se encuentra en el agua, utilizando métodos físicos o biológicos que transforman u oxidan estos compuestos. La DQO indica la cantidad total de carga orgánica que tiene potencial para reaccionar con un fuerte agente oxidante, por lo que su reducción indica la eliminación de compuestos

orgánicos que pueden causar efectos negativos en el medio ambiente, tales como el consumo de oxígeno disuelto, malos olores o toxicidad. En los sistemas de tratamiento, la reducción de la DQO se logra esencialmente a través de técnicas como coagulación-floculación, adsorción, oxidación avanzada y digestión biológica, lo que ayuda a mejorar la calidad del efluente y a adherirse a las normas ambientales. (Guardia Curasma & Ccente Inga, 2023)

- Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso biotecnológico que emplea plantas y los microorganismos que viven en asociación con ellas para eliminar, cambiar, estabilizar o descomponer contaminantes que se encuentran en el suelo y el agua. Esta metodología se basa en la habilidad innata de algunas especies de plantas para absorber metales pesados, nutrientes, sustancias orgánicas y otros elementos contaminantes a través de mecanismos como la fitoextracción, fitodegradación, fitoestabilización, rizofiltración y fitovolatilización. Dichos procesos tienen lugar tanto en la parte aérea como en las raíces, donde las raíces y las comunidades microbianas de la rizosfera juegan un papel crucial en la degradación y transformación de compuestos nocivos. La fitorremediación se ve como una opción efectiva, rentable y sostenible para el tratamiento de áreas contaminadas, sobre todo en ecosistemas de climas tropicales y subtropicales. (Delgadillo Lopez et al., 2011)

- PH

El pH se considera una medida que refleja la cantidad de iones de hidrógeno (H^+) en el agua, indicando su nivel de acidez o alcalinidad. Esta escala logarítmica oscila entre 0 y 14, donde valores inferiores a 7 sugieren un ambiente ácido, valores superiores a 7 apuntan a alcalinidad, y un pH de 7 representa un estado neutral. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad del agua, ya que afecta la disolución de compuestos químicos, la toxicidad de metales pesados, la efectividad de los métodos de desinfección y el balance de los ecosistemas acuáticos. Cambios importantes en este parámetro pueden modificar la estabilidad química del agua, la supervivencia de las especies y la efectividad de tratamientos en plantas de tratamiento de agua potable o de aguas residuales. (Osorio, 2012)

- Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno molecular (O_2) presente en el agua en forma disuelta, expresado en miligramos por litro (mg/L). Es uno de los parámetros más

importantes para evaluar la calidad del agua y el estado de los procesos biológicos en sistemas de tratamiento. En humedales artificiales, el OD cumple un rol determinante en los procesos de degradación aerobia de materia orgánica, nitrificación y mantenimiento de la vida acuática. Los valores de OD en sistemas de flujo subsuperficial tienden a disminuir a lo largo del recorrido del agua debido al consumo por parte de los microorganismos y a la limitada transferencia de oxígeno desde la atmósfera, lo que favorece el establecimiento de zonas anóxicas donde ocurren procesos complementarios como la desnitrificación. Valores de OD inferiores a 2 mg/L indican condiciones predominantemente anóxicas, características del interior del sustrato en humedales subsuperficiales en operación activa (Vymazal, 2010)

- *Nitrógeno Total*

El nitrógeno total en aguas residuales comprende todas las formas de nitrógeno presentes en el agua, incluyendo el nitrógeno orgánico, el amoniacal (NH_4^+), los nitritos (NO_2^-) y los nitratos (NO_3^-). Es un nutriente esencial para el crecimiento microbiano y vegetal, pero en concentraciones elevadas constituye un contaminante que puede generar eutrofización en cuerpos de agua receptores. En los humedales artificiales, la remoción de nitrógeno total ocurre mediante procesos combinados de nitrificación en zonas aerobias, desnitrificación en zonas anóxicas y asimilación directa por parte de la vegetación a través del sistema radicular. La eficiencia de remoción depende directamente del tiempo de retención hidráulica, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno en el sustrato, siendo su monitoreo obligatorio según la Norma Técnica OS.090 de DIGESA (Wallace, 2009)

- *Fósforo Total*

El fósforo total incluye todas las formas de fósforo presentes en el agua, tanto en forma particulada como disuelta, orgánica e inorgánica. Su presencia en aguas residuales proviene principalmente de detergentes, excretas humanas y fertilizantes agrícolas. En cuerpos receptores, el exceso de fósforo es el principal causante de procesos de eutrofización que deterioran la calidad del ecosistema acuático. En humedales artificiales, los mecanismos de remoción incluyen la precipitación química, la adsorción en el sustrato y la absorción por parte de las plantas. Sin embargo, la capacidad de adsorción del sustrato puede saturarse con el tiempo, limitando la eficiencia del sistema. Asimismo, durante la etapa inicial de funcionamiento puede ocurrir el fenómeno de desorción de fósforo, en el cual el sustrato libera fosfatos al agua en lugar de retenerlos, generando incrementos

temporales en la concentración de este parámetro en el efluente. (Delgadillo López et al., 2011).

- ***Turbidez.***

La turbidez se define como una evaluación de la limpidez del agua y refleja la cantidad de elementos suspendidos, incluidos sedimentos, arcillas, materia biológica, microorganismos y otros componentes sólidos que alteran la luz. Según el informe sobre Aire, agua y legionela (2018), este aspecto es un indicador clave de la pureza del agua, dado que altas concentraciones pueden interferir en los procedimientos de desinfección, proteger a los gérmenes perjudiciales del cloro y favorecer la proliferación de bacterias. Asimismo, la turbidez puede impactar en el color, aroma y aceptación del agua por parte de los consumidores, siendo un parámetro esencial tanto para las plantas de tratamiento de agua potable como para el control ambiental. Su vigilancia es crucial para garantizar que el agua destinada al consumo humano sea segura.

- ***Sólidos suspendidos totales***

Los sólidos ingresan al sedimento como escombros y son en su mayoría se descomponen a través de procesos anaeróbicos. Debido a la relación de muchos contaminantes con los sólidos suspendidos en el agua, dichos procesos sumamente esenciales. La floculación es el proceso de aglutinación de partículas pequeñas, que son atraídas y gracias a la suave corriente de agua en el humedal. Si bien la forma y la densidad también son significativos, importantes, el tamaño de las partículas generalmente también afecta la sedimentación. Por otra parte, las partículas pueden ser individuales o en grupos. (Guardia Curasma & Ccente Inga, 2023)

- ***Conductividad Eléctrica.***

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, expresada en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Este parámetro refleja indirectamente la concentración total de iones disueltos en el agua, incluyendo sales minerales, metales y compuestos inorgánicos. En sistemas de humedales artificiales, la conductividad puede incrementarse durante la etapa de arranque debido a la liberación de iones minerales del sustrato granular nuevo, los procesos de mineralización de materia orgánica por acción microbiana y el efecto de la evapotranspiración de la vegetación que concentra los solutos al reducir el volumen de agua. Estos incrementos son de carácter transitorio y tienden a estabilizarse conforme el sistema alcanza su madurez operativa (Vymazal, 2014)

- **Remoción de patógeno.**

(Guardia Curasma & Ccente linga, 2023) Consideran vital disminuir, eliminar o reducir la concentración de microorganismos fecales para asegurar buenas condiciones sanitarias, especialmente en el caso de reutilización de aguas residuales. La eliminación de microorganismos es un proceso sumamente complejo, ya que está influenciado por diversos factores, tales como la filtración, la adsorción y la depredación. Tanto en sistemas verticales como horizontales, se ha notado que la eficacia de eliminación varía según el tiempo de residencia y del medio granular.

$$Remoción(\%) = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100$$

Ecuación 1

Donde:

- Ci = concentración inicial de patógenos
- Cf = concentración final después del tratamiento

- **Impermeabilización**

La impermeabilización es un eslabón clave en la construcción de humedales artificiales. Se trata de instalar una capa impermeable (arcilla, bentonita, asfalto, geomembrana u otro tipo de fibras sintéticas) para evitar la contaminación del suelo y proteger las aguas subterráneas. Es importante compactar y nivelar el fondo del área húmeda para que permanezca ligeramente inclinado para asegurar un drenaje adecuado y garantizar un flujo eficiente a través del sistema. (Moreno Mogollón & Rangel Plata, 2018)

- **Medio granular**

En los humedales se acumulan sedimentos como la Arena, grava, roca, el crecimiento biológico constituye el sustrato. La característica principal del medio es que debe tener suficiente permeabilidad para permitir el paso del agua pase a través de él. Ofrece almacenamiento para una variedad de contaminantes. (Serrano García & Corzo Hernández, 2008)

Proporciona almacenamiento para numerosos contaminantes. En las zonas de entrada y salida se ubican piedras que ayudan a distinguir estos sectores del medio granular principal. En el sistema compuesto por medio granular se desarrollan diversos procesos, tales procesos incluyen la retención y sedimentación de las partículas en suspensión, ya que estas propiedades son determinantes en la cantidad de agua que pueda fluir a través

de dicho sistema. Al llevar a cabo el diseño del sistema el sistema, es crucial tener en cuenta que la conductividad hidráulica tiende a reducirse con el paso del tiempo. (Serrano García & Corzo Hernández, 2008)

- ***Vegetación***

La elección de la vegetación para un sistema de humedales debe considerar las particularidades de la región en la que se desarrollará en proyecto, así como tomar en cuenta las siguientes recomendaciones. (Guardia Curasma & Ccente Inga, 2023)

- Las especies deben colonizar activamente y poseer un sistema de rizomas extenso.
- Deben alcanzar alta biomasa por área para maximizar la absorción de nutrientes
- La biomasa subterránea debe tener una gran superficie para favorecer.
- Deben contar con un sistema eficiente de transporte de oxígeno hacia las raíces para facilitar la nitrificación
- Deben ser especies adaptables al entorno del sistema planeado
- deben mostrar alta productibilidad

- ***Método del tresbolillo***

El método del tresbolillo es un sistema de distribución de plantas que consiste en ubicar los individuos en una disposición triangular o hexagonal, donde las hileras se establecen de manera alternada. Esta configuración permite un mejor aprovechamiento del área disponible en comparación con una distribución rectangular, ya que incrementa el número de plantas por unidad de superficie y favorece una cobertura más uniforme del terreno. En sistemas vegetados y diseños de humedales artificiales, este método contribuye a optimizar la distribución radicular y mejorar la interacción entre las plantas y el medio filtrante. (Carbo Gomez & Vidal Marco, 1978)

$$NP = \frac{S}{A * 0.866}$$

Ecuación 2

Donde:

- NP : Número de plantas
S : Superficie a sembrar
A : Área ocupada por la planta

- ***Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*.**

Canna tuerckheimii y *Phragmites australis* son especies vegetales adaptadas a zonas húmedas, ampliamente utilizadas en sistemas de humedales por su alta capacidad de remoción de contaminantes. (Fernández Viveros et al., 2024)

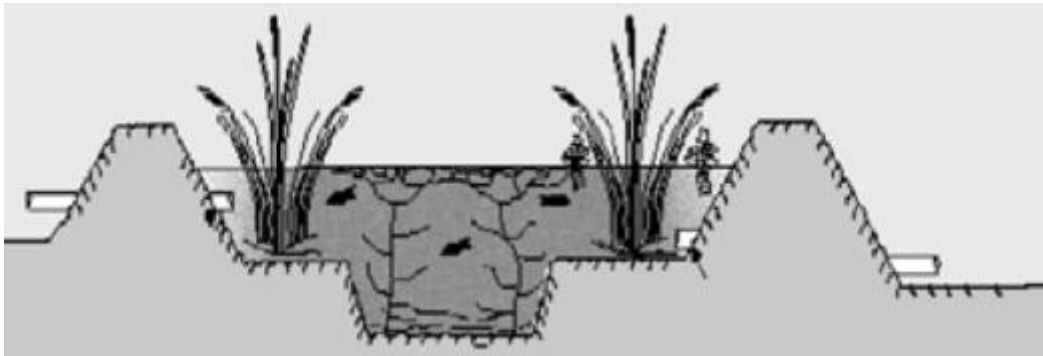
Canna tuerckheimii es una planta herbácea tropical con rizomas grandes y raíces profundas que mejoran la oxigenación del sustrato y favorecen la actividad microbiana aerobia. Tiene buena capacidad de absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. (Fernández Viveros et al., 2024)

Phragmites australis, o carrizo común, es una macrófita emergente de amplio uso en humedales artificiales por la capacidad de su sistema radicular para actuar como barrera biológica, favoreciendo la remoción de contaminantes mediante procesos de acumulación, translocación y transpiración. (Amabilis Sosa et al., 2016)

Ambas especies contribuyen eficazmente a la mejora de la calidad del agua, favorecen la estabilidad del humedal y proporcionan hábitat para fauna silvestre.

Figura 4.

Representación de las plantas



Nota: Sistema de depuración por David Nuevo, Ingeniería de aguas

- ***Tiempo de retención hidráulica (TRH)***

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es un parámetro crítico en el diseño y operación de humedales artificiales, ya que representa el tiempo promedio que las aguas residuales permanecen en el sistema de tratamiento, permitiendo que se desarrollen los procesos físicos, químicos y biológicos responsables de la remoción de contaminantes. Una TRH adecuada promueve la sedimentación de sólidos suspendidos, la biodegradación de la materia orgánica, la adsorción en medios granulares y la actividad microbiana asociada a la rizosfera, que afectan directamente la eficiencia de eliminación de parámetros como

DQO, SST y metales. Efectos de la TRH en humedales artificiales híbridos, comparando tiempos de retención de 3 y 6 días, concluyeron que la TRH de 6 días permitió una mayor eficiencia de tratamiento, especialmente en sistemas de flujo subterráneo, debido a una mayor estabilidad hidráulica y un mayor contacto entre efluente, sustrato y vegetación; Sin embargo, el autor señala que demasiado tiempo puede tener efectos indeseables, como la proliferación de algas en los sistemas de flujo superficial, por lo que la TRH debe optimizarse cuidadosamente según el tipo de humedal y la carga contaminante. (Lima Coasaca, 2021)

- *Carga hidráulica y carga orgánica*

La carga hidráulica y la carga orgánica son parámetros operativos clave en el diseño y operación de humedales artificiales, ya que controlan la dinámica del flujo y la disponibilidad de sustrato en los procesos de tratamiento biológico. La carga hidráulica se define como la relación del caudal aplicado al humedal y regula el caudal de agua a través del filtro, lo que incide directamente en el tiempo de contacto entre las aguas residuales, el sustrato, la vegetación y los microorganismos; Los valores altos pueden provocar cortocircuitos hidráulicos y reducir la eficiencia del procesamiento. La carga orgánica, por otro lado, representa la cantidad de materia orgánica, generalmente expresada como DBO₅, aplicada por unidad de área y tiempo, lo que determina la actividad microbiana y la capacidad del sistema para eliminar contaminantes. El aumento simultáneo de ambas cargas en humedales de flujo vertical puede mejorar inicialmente la eliminación de materia orgánica en condiciones controladas; Sin embargo, las cargas excesivas provocan acumulación de sólidos, reducción de la conductividad hidráulica y obstrucción de los medios granulares, lo que afecta negativamente la eficiencia general del sistema, por lo que ambos parámetros deben optimizarse cuidadosamente para garantizar un funcionamiento estable y sostenible. (Rozo Flórez, 2016)

- *Importancia del pretratamiento en sistemas de humedales*

La implementación del pretratamiento en sistemas de humedales artificiales es de vital importancia para garantizar su eficiencia, estabilidad operativa y vida útil, especialmente cuando estos sistemas reciben aguas crudas o con altas cargas de sólidos, materia orgánica y microorganismos. El pretratamiento permite reducir la carga contaminante inicial que ingresa al humedal, disminuyendo concentraciones de turbiedad, demanda química de oxígeno y coliformes fecales, lo que previene la colmatación prematura del medio filtrante y evita alteraciones hidráulicas como cortocircuitos o reducción del tiempo de

retención hidráulica. El uso de humedales artificiales como etapa de pretratamiento previo a procesos de potabilización demostró remociones superiores al 45 % en turbiedad, mayores al 40 % en DQO y superiores al 80 % en coliformes fecales, evidenciando que esta etapa reduce significativamente la carga orgánica y patogénica que ingresa a los tratamientos posteriores. Asimismo, el autor destaca que el pretratamiento con humedales contribuye a la disminución del consumo de insumos químicos y de los costos operativos en las plantas de tratamiento, bajo el enfoque de múltiples barreras para la protección de la calidad del agua, consolidándose como una alternativa sostenible y eficiente para mejorar el desempeño integral de los sistemas de tratamiento hídrico. (Castillo Nava, 2024)

- Metodología de Reed para el diseño de humedales

La metodología propuesta por Reed se fundamenta en la aplicación de modelos cinéticos de primer orden para el diseño de sistemas naturales de tratamiento, como los humedales artificiales, considerando que la remoción de contaminantes es proporcional a su concentración bajo condiciones de flujo tipo pistón y estado estacionario. Este enfoque permite determinar el área requerida del humedal en función del caudal, las concentraciones de entrada y salida del contaminante, así como de las características hidráulicas del medio, siendo ampliamente utilizado en el diseño de humedales de flujo superficial y subsuperficial debido a su simplicidad y aplicabilidad en sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo costo. (Camilo Iván, 2021)

- Eficiencia en la Remoción de Contaminantes

La eficiencia de la eliminación de contaminantes en humedales artificiales está determinada por la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el sistema, como la sedimentación, filtración, adsorción en el sustrato, asimilación vegetal y biodegradación microbiana. Diversos estudios han demostrado que los humedales artificiales, especialmente aquellos con flujo subterráneo horizontal, son muy efectivos para eliminar materia orgánica y sólidos en suspensión, logrando reducciones de DBO₅ y SST de más del 90% y reducciones de DQO del 83% al 94%, siempre que operen en condiciones hidráulicas adecuadas. Una tesis de (Cardona & Vanegas, 2009) evaluó tres humedales artificiales plantados con *Phragmites australis*, logrando eficiencias de remoción de DBO₅ de 90% a 96%, DQO de 83% a 94% y sólidos suspendidos totales, mostrando tiempos de retención de aplicación hidráulica de 9%.8. afectar significativamente el rendimiento del sistema. Asimismo, los resultados indicaron la

separación del nitrógeno total del 61% al 77% y del fósforo total al 90%, confirmando que los humedales artificiales son una alternativa eficaz y sostenible para reducir la carga de contaminantes en aguas residuales domésticas con bajos requerimientos operativos y alta estabilidad operativa. (Castillo Nava, 2024)

- *Biorremediación en Humedales Artificiales*

La biorremediación en humedales artificiales utilizando microorganismos efectivos (ME) en combinación con macrófitos acuáticos es una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas residuales industriales como las de curtiembres, considerando la complejidad y toxicidad de sus contaminantes. La inclusión de ME en humedales artificiales con especies de *Eichhornia crassipes* y *Lemna gibba* mejora significativamente los procesos de degradación biológica, acelerando la descomposición de la materia orgánica y promoviendo la conversión de compuestos menos dañinos en compuestos menos dañinos. Asimismo, la interacción entre microorganismos y raíces de macrófitos fortaleció los mecanismos de descomposición del rizoma, fitoabsorción y bioadsorción, logrando mejoras significativas en la calidad de las aguas residuales, lo que se refleja en la reducción de parámetros como DBO, DQO, materia suspendida y turbidez. Los resultados del estudio confirman que la biorremediación integrada en humedales artificiales no sólo aumenta la eficiencia de la eliminación de contaminantes, sino que también contribuye a la estabilidad del sistema y la sostenibilidad del tratamiento, consolidándose como una tecnología económica y respetuosa con el medio ambiente para la gestión de aguas residuales industriales. (Castillo Nava, 2024)

1.2.1.12. Aforamiento de caudal

El aforamiento es la operación mediante la cual se mide el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un curso de agua en la unidad de tiempo, expresado en litros por segundo (L/s) o metros cúbicos por segundo (m³/s). Esta medición es fundamental en estudios hidrológicos y de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que el caudal determina directamente el dimensionamiento de las estructuras de captación, distribución y tratamiento (Villón, 2002)

- *Método volumétrico*

El método volumétrico es el procedimiento de aforamiento más recomendable para caudales pequeños y de fácil acceso. Consiste en medir el tiempo necesario para llenar un

recipiente de volumen conocido con el flujo de agua a aforar, calculando el caudal mediante la siguiente expresión:

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

Ecuación 3

Donde:

- Q = Caudal (L/s)
- V = Volumen del recipiente (L)
- t = Tiempo de llenado (s)

Para obtener mayor exactitud se recomienda repetir la operación un mínimo de tres veces y calcular el promedio del caudal obtenido. Los materiales requeridos son un recipiente de capacidad conocida, un cronómetro con margen de variación de 0.2 segundos y elementos de conducción del flujo hacia el recipiente. Este método es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos de pequeñas cuencas por su bajo costo, simplicidad de aplicación en campo y resultados confiables para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales a escala local (SENAMHI, 2011)

1.3. MARCO NORMATIVO

El desarrollo de la presente investigación se sustenta en el marco normativo nacional e internacional que regula la gestión ambiental, la calidad de agua y el tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías naturales como los humedales artificiales. Estas normas establecen los criterios técnicos, los límites máximos permisibles (LMP), los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los lineamientos para el monitoreo y análisis de los parámetros estudiados.

- Normativa Nacional 1. Ley N° 28611 – Ley General del Ambiente

Establece los principios de protección, gestión integrada de los recursos hídricos y prevención de la contaminación. Reconoce la obligación del Estado y de los usuarios de garantizar la calidad del agua en cuerpos naturales como ríos, lagos y acuíferos.

- Decreto Legislativo N.º 1280 – Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento

Define los lineamientos para la adecuada gestión de aguas residuales y obliga a los prestadores a asegurar que los efluentes tratados cumplan con las normas de calidad

vigentes. Resalta el uso de tecnologías económicas y eficientes, donde se incluyen sistemas naturales como humedales.

- Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM – Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua

Regula los valores máximos de parámetros físicos, químicos y microbiológicos permitidos en cuerpos de agua según su categoría de uso. Para este estudio se consideran principalmente los valores de la Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales, dado que el río Alameda presenta usos vinculados a actividades agrícolas. Entre los parámetros relevantes se encuentran: DBO₅, DQO Sólidos Suspendidos Totales (SST) Nitrógeno total y nitratos Fósforo total Coliformes termo tolerantes Parámetros físicos como turbiedad y conductividad. (El Peruano, 2009)

Tabla 1.

Estándares de Calidad Ambiental (ECA) - Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetro	D1: Riego de vegetales	D2: Bebida de animales	Unidad
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	≥ 4	≥ 5	mg/L
pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.4	—

Fuente: Según el D.S. N.º 004-2017-MINAM

- Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM – Límites Máximos Permisibles (LMP) para Vertimientos de Aguas Residuales

Regula los parámetros que deben cumplir los efluentes generados por actividades municipales y productivas antes de ser vertidos a cuerpos naturales de agua. Los valores de DBO, DQO, SST y coliformes fecales evaluados en esta investigación se comparan frente a estos límites para identificar el grado de contaminación en el río Alameda. (El Peruano et al., 2010)

Tabla 2.

Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de PTAR.

Parámetro	Límite Máximo Permitido	Unidad
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	100	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	200	mg/L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	150	mL/L
Aceites y Grasas	20	mg/L
Coliformes Termotolerantes	10 000	NMP/100 mL
pH	6.5 – 8.5	unidad
Temperatura	< 35	°C

Fuente: Según el DS N.º 003-2010-MINAM

- Norma Técnica OS.090 – DIGESA

La Norma Técnica OS.090, emitida por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), establece los lineamientos para el control sanitario y la evaluación de aguas residuales. Esta norma define los parámetros mínimos que deben ser analizados para determinar la calidad de las aguas residuales, incluyendo la DBO₅, DQO, sólidos totales y suspendidos, nutrientes y coliformes fecales (DIGESA, s. f.).

Tabla 3. Selección de los procesos de tratamiento de las aguas residuales

PROCESO DE TRATAMIENTO	REMOCIÓN (%)		REMOCIÓN ciclos log ₁₀	
	DBO	Sólidos en suspensión	Bacterias	Helmintos
Sedimentación primaria	25-30	40-70	0-1	0-1
Lodos activados	70-95	70-95	0-2	0-1
Filtros percoladores	50-90	70-90	0-2	0-1
Lagunas aireadas	80-90	(c)	1-2	0-1
Zanjas de oxidación	70-95	80-95	1-2	0-1
Lagunas de estabilización	70-85	(c)	1-6	1-4

Fuente: Según Norma Técnica OS.090 - DIGESA

- Límites referenciales de calidad de efluentes líquidos en el Perú

Además de los LMP establecidos por el Ministerio del Ambiente, existen valores referenciales de calidad de efluentes líquidos utilizados en estudios técnicos y académicos en el Perú. Estos valores permiten realizar comparaciones adicionales del comportamiento de los sistemas de tratamiento, especialmente cuando se evalúan parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

CAPITULO II.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. ASPECTOS GENERALES

2.1.1. Área de estudio

El área de estudio correspondió al río Alameda, ubicado en el distrito de Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, región Ayacucho – Perú. Este tramo del río constituyó uno de los principales cursos de agua que atraviesan la zona urbana del distrito, recibiendo aportes provenientes de descargas domésticas, efluentes sin tratamiento y escorrentías superficiales, factores que han generado un deterioro progresivo en su calidad ambiental.

Las actividades de investigación se desarrollaron en un punto estratégico del río Alameda, el cual fue seleccionado por presentar una carga contaminante representativa, adecuada accesibilidad y condiciones favorables para la instalación del sistema de humedales artificiales. El entorno inmediato estuvo caracterizado por la presencia de viviendas dispersas, áreas agrícolas en las márgenes altas, zonas con actividad comercial y asentamientos humanos, los cuales generaron descargas de aguas residuales sin tratamiento previo.

El área de estudio presentó un clima característico de la sierra central peruana, con temperaturas medias anuales comprendidas entre 12 °C y 18 °C. El régimen de precipitaciones se concentró entre los meses de diciembre y marzo, mientras que el periodo seco se extendió de abril a noviembre. Estas condiciones climáticas influyeron directamente en el comportamiento hidráulico del río y en la disponibilidad del recurso hídrico durante las campañas de muestreo realizadas.

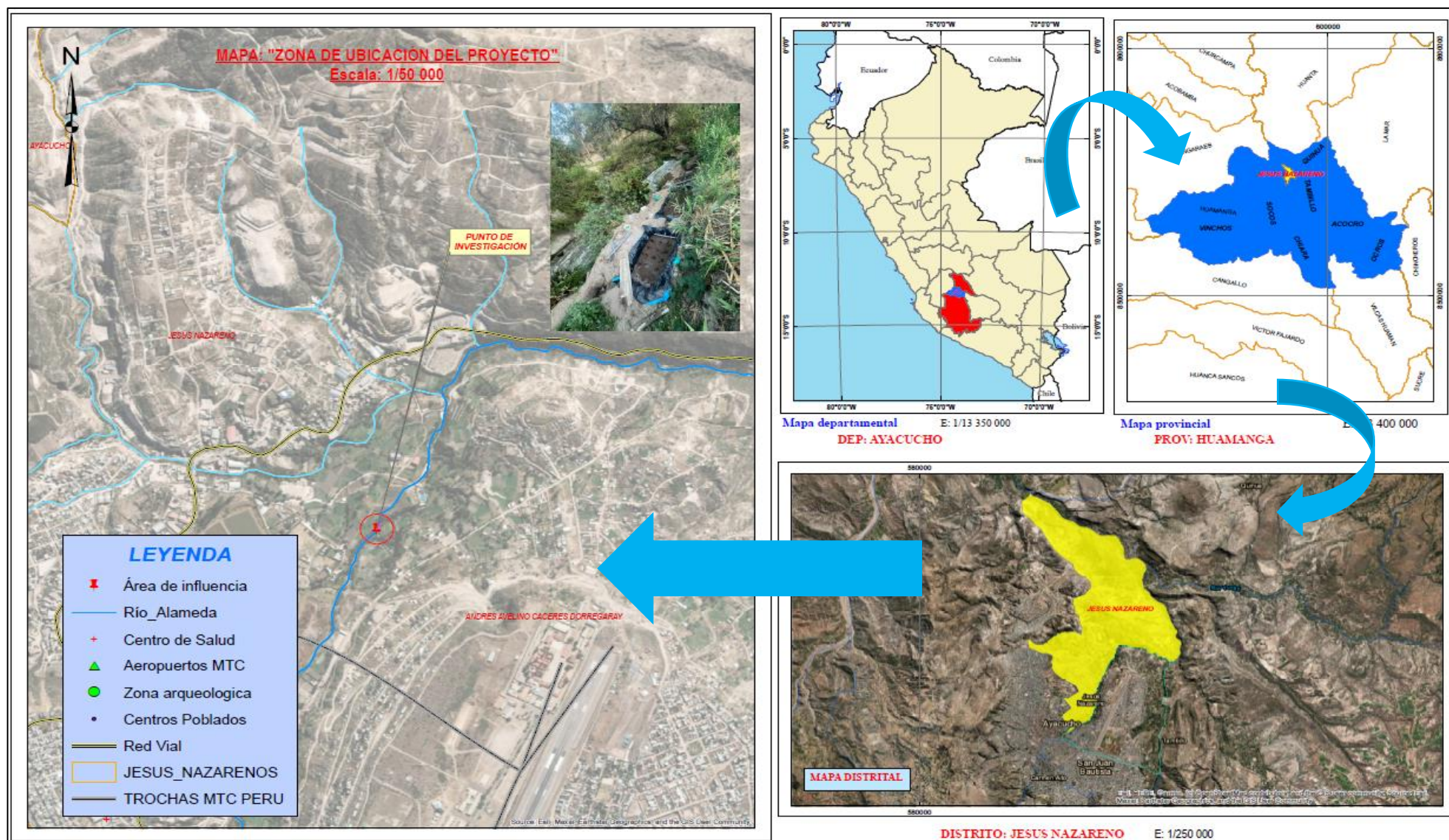
El suelo predominante en la ribera del río Alameda presentó una textura franco-arenosa, condición que permitió la ejecución de excavaciones y facilitó el establecimiento de estructuras de tratamiento natural, como los humedales artificiales. Asimismo, la pendiente moderada del terreno permitió derivar el flujo de agua hacia las celdas del humedal sin requerir sistemas de bombeo, favoreciendo la operación del sistema por gravedad.

El punto evaluado estuvo expuesto de manera continua al aporte de contaminantes orgánicos, nutrientes y microorganismos patógenos, situación que fue evidenciada mediante los análisis realizados antes de la intervención, en los cuales se registraron valores elevados de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno,

sólidos suspendidos totales, nitrógeno total y coliformes fecales. Estas condiciones justificaron la implementación del sistema de humedales artificiales como una alternativa de tratamiento ecológica, económica y adecuada al contexto local.

Figura 5.

Mapa de ubicación del área de estudio.



2.1.2. Ubicación política

Administrativamente, esta zona forma parte del ámbito territorial del Gobierno Regional de Ayacucho y se encuentra bajo la gestión municipal del Gobierno Local del distrito de Jesús Nazareno.

El área forma parte de la cuenca del río Alameda, un afluente urbano que atraviesa varias zonas residenciales y comerciales de la ciudad de Ayacucho, lo que facilita la accesibilidad al punto de intervención.

2.1.3. Ubicación geográfica

Geográficamente, el punto de intervención se encuentra situado en la zona urbana del distrito, dentro de la cuenca del río Alameda, afluente menor que desemboca en el río Huatatas y posteriormente en el Mantaro. Las coordenadas geográficas del punto de intervención. Latitud Sur 13°8'21" y Longitud Oeste 74°12'20" del meridiano Greenwich, a una altitud 2603.2 msnm.

2.1.4. Límites

La demarcación oficial indica que el límite noreste con Pacaycasa y Quinoa se establece desde la confluencia del río Huamanhura con el río Pongora, ascendiendo aguas arriba por el cauce del río Ocopa hasta un punto de confluencia entre los ríos Chacco y Yucaes. El límite sureste con Tambillo y Ayacucho comienza en la confluencia de los ríos Chacco y Yucaes, continúa por el cauce del río Chacco hasta la confluencia de los ríos Huatatas y Alameda, y luego por el cauce del río Alameda hasta la desembocadura de la quebrada Tarahuaycco. Finalmente, los límites sur y oeste corresponden al distrito Ayacucho, tomando como referencia la desembocadura de la quebrada Tarahuaycco en el río Alameda y trazos urbanos hasta avenidas definidas en el plano demarcatorio.

2.1.5. Vía de acceso

El acceso al área de Jesús Nazareno, donde se encuentra el río Alameda, se lleva a cabo principalmente a través de la red de carreteras que conecta este sector con la ciudad de Ayacucho. La vía más significativa para ingresar es la Carretera Ayacucho - Quinoa, que cruza el distrito y permite la comunicación directa con la ciudad de Ayacucho, así como con los distritos del norte de la provincia. Desde el núcleo urbano de Ayacucho, la entrada se realiza a través de la Avenida 26 de Enero, la cual conecta con localidades y áreas residenciales que están próximas al lecho del río Alameda.

Tabla 4.*Vías de acceso al punto de investigación*

Tipo de vía	Nombre / Ruta	Descripción	Condición
Vía principal	Carretera Ayacucho – Quinua	Conecta Ayacucho con Jesús Nazareno; pasa cerca del área del río Alameda.	Pavimentada
Vía secundaria	Av. 26 de Enero	Principal acceso urbano desde la ciudad de Ayacucho hacia el distrito y zonas cercanas al río.	Pavimentada
Vías locales	Calles y jirones internos del distrito	Permiten llegar directamente a puntos específicos de muestreo en el río Alameda.	Pavimentadas y afirmadas
Transporte público	Rutas urbanas Ayacucho – Jesús Nazareno	Facilitan el ingreso constante al área de estudio.	Operativo todo el día
Acceso peatonal	Sendas vecinales próximas al cauce	Permiten el ingreso a sectores donde no llegan vehículos.	Variable (tierra/afirmado)

También hay accesos secundarios mediante calles y jirones del barrio que permiten llegar a lugares específicos de monitoreo a lo largo del río, facilitando las labores de evaluación de la calidad del agua y el acceso a zonas donde se establecen humedales artificiales u otras infraestructuras ecológicas. El distrito dispone de servicios de transporte, tanto públicos como privados, que operan de forma regular, garantizando un flujo continuo hacia el área de estudio. Las condiciones viales son principalmente urbanas, presentando tramos pavimentados y secciones sin pavimentar en áreas periféricas cercanas al lecho del río.

2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Para su desarrollo del presente estudio se utilizaron materiales e instrumentos necesarios tanto para construcción del humedal, la toma de muestras de agua y el registro de datos durante las diferentes etapas de la investigación.

2.2.1. Materiales y equipos en campo

2.2.1.1. Materiales para los Humedales

- Piedra chancada
- Arena gruesa
- Arena fina
- Plástico (Reemplazo de la geomembrana)
- Tubería PVC de ½”, 2” y 4”
- Accesorios (Codos, Uniones y Tees)
- Alambre N° 1.
- Nivel de mano

- Estacas
- Yeso
- Malla
- Flexo
- Cemento Tipo I
- Agua
- Balde de 20 L

2.2.1.2. Materiales para el muestreo para la calidad de agua

- Caja Tecnopor mediana
- Frasco de plástico natural 1000 ml
- Frasco de plástico natural 120 ml
- Frasco de plástico natural 500 ml
- Cadena de custodia de aguas y suelos
- Frasco de vidrio SCHOTT 250 ml
- Frasco vidrio WINKLER 300ml
- Guantes de látex
- Ácido sulfúrico

2.2.2. Materiales y equipos en oficina

- Laptop
- Papel Bond A4, A3 y A2
- Impresora
- Lapiceros
- Cuaderno de notas

2.2.3. Programas de Ingeniería

- AutoCAD Civil 3D 2024
- ArcGIS 10.8.0
- ArcGis Pro
- Google Earth Pro
- Microsoft Office

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. Reconocimiento del área de estudio

El reconocimiento del área se realizó en el río Alameda, ubicado en el Distrito de Jesús Nazareno, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho. Esta etapa permitió identificar las características físicas y ambientales del lugar donde se implementaron los humedales artificiales.

Figura 6.

Imagen satelital del punto de investigación



Nota. El trazo en color azul representa la vía de acceso, en tanto que el punto rojo señala la ubicación del área de intervención.

2.3.1.1. Características generales del área de estudio

Las características generales del área de estudio fueron determinadas a partir de la delimitación proporcionada por el programa ArcGIS 10.8. En función de dicho análisis, se identificaron los siguientes aspectos.

- *Fisiografía*

La unidad fisiográfica “CVmi” corresponde a colinas de origen volcánico que presentan pendientes moderadas, generalmente entre 15 % y 30 %. Según la figura 8, el paisaje muestra crestas suavizadas, flancos intermedios e interfluvios angostos, que favorecen un drenaje superficial relativamente rápido. Debido a la naturaleza volcánica de los materiales, los suelos suelen ser francos arenosos a franco limosos, con presencia de fragmentos piroclásticos. La cobertura vegetal es generalmente discontinua, dominada por matorrales y herbazales adaptados a condiciones de pendiente media. Su aptitud

natural está orientada a pastos naturales, forestación, y usos agrícolas restringidos en áreas donde la pendiente lo permite.

- ***Geomorfología***

La unidad geomorfológica TI corresponde a una Terraza Intermedia, es decir, un nivel de superficie relativamente plana o ligeramente ondulada que se ubica entre la terraza alta y la terraza baja dentro del sistema fluvial. El material predominante es aluvial estratificado, compuesto por gravas, arenas, limos y ocasional presencia de cantos redondeados, evidenciando eventos pasados de transporte y deposición fluvial. La superficie de las terrazas intermedias suele ser moderadamente estable, con pendientes suaves (2–8 %), y una buena capacidad de drenaje. Estos rasgos geomorfológicos favorecen el desarrollo de suelos relativamente profundos y aptos para actividades agropecuarias, aunque pueden presentarse zonas con erosión laminar o cárcavas si la cobertura vegetal es escasa.

- ***Tipo de suelos***

Los Typic Haplustands son suelos derivados principalmente de materiales volcánicos, característicos de regiones con clima seco subhúmedo a semiárido, donde la estacionalidad de lluvias es marcada. Estos suelos pertenecen al orden Andisols, conocidos por su alta porosidad, baja densidad aparente y excelente capacidad de retención de agua, gracias a la presencia de minerales amorfos como allófana y ferrihidrita. Su textura suele ser franco-arenosa a franco limosa, con una estructura granular muy estable. Presentan una buena fertilidad física, aunque su fertilidad química puede ser moderada debido a la fijación de fósforo y cationes por los complejos húmico alofónicos.

- ***Uso actual del suelo***

En la zona de estudio está dominado por áreas agrícolas, las cuales se distribuyen principalmente en las zonas con pendientes suaves a moderadas y en superficies fisiográficas estables como terrazas fluviales, colinas moderadas y llanuras aluviales. Estas áreas se destinan al cultivo de productos de importancia local y regional, aprovechando la disponibilidad de agua, la fertilidad relativa de los suelos y las condiciones climáticas favorables durante la temporada de lluvias.

Las áreas agrícolas presentaron parcelas de cultivo abiertas, generalmente de tamaño pequeño a mediano, manejadas bajo sistemas tradicionales y semitecnificados. Se cultivan especies anuales y perennes según la disponibilidad hídrica, destacando:

Cereales (trigo, cebada, maíz amiláceo); Tubérculos (papa, olluco, oca); Hortalizas (lechuga, zanahoria, cebolla, tomate, según altitud); Leguminosas (haba, arveja); Cultivos forrajeros (alfalfa, avena forrajera).

En algunas zonas, especialmente las cercanas a cursos de agua o áreas con riego, se encuentran cultivos permanentes, mientras que en las zonas de secano predominan cultivos de ciclo corto adaptados a la estacionalidad de lluvias.

Figura 7.

Mapa de tipo de suelos del punto de intervención

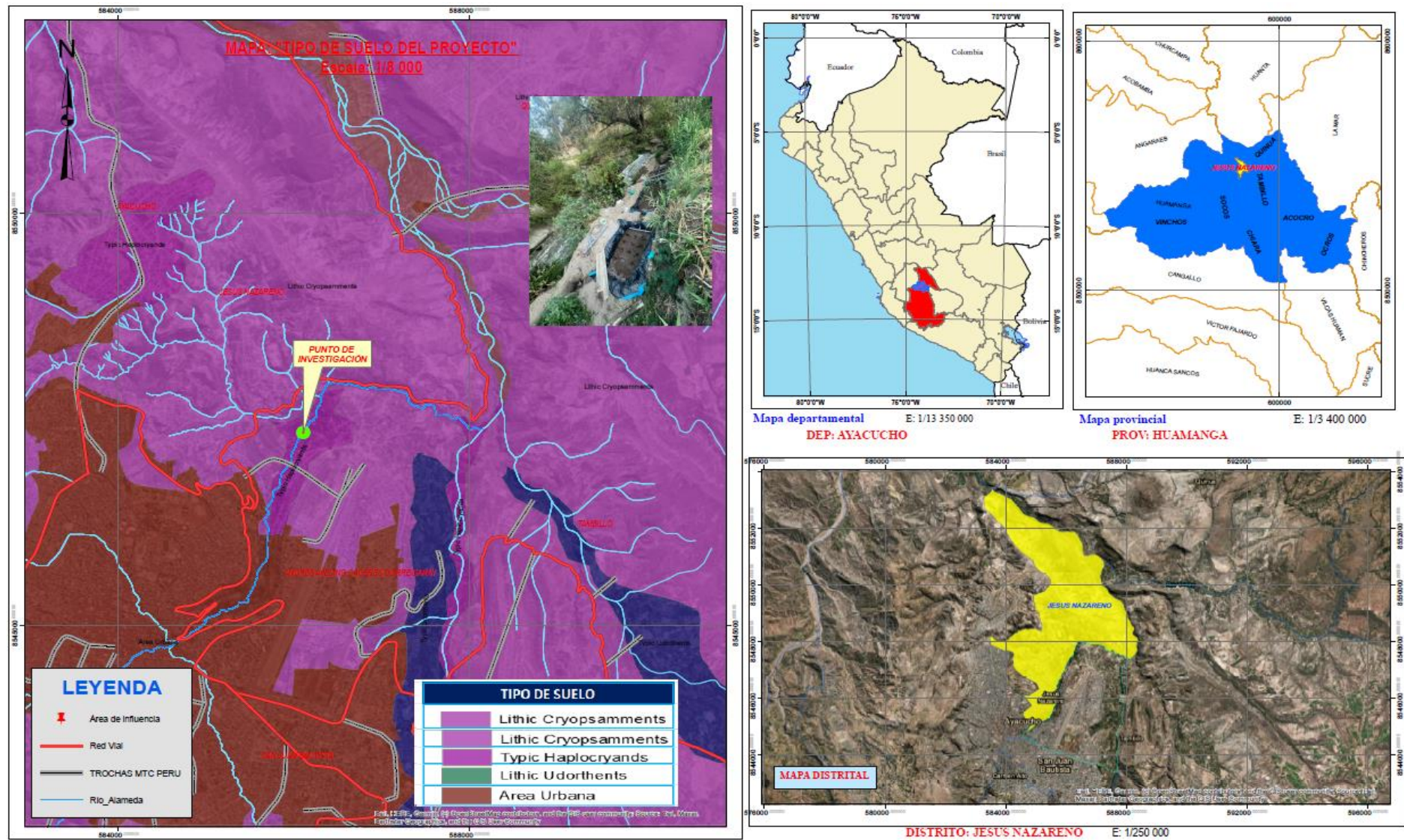


Figura 8.

Mapa de la Geomorfología del punto de intervención

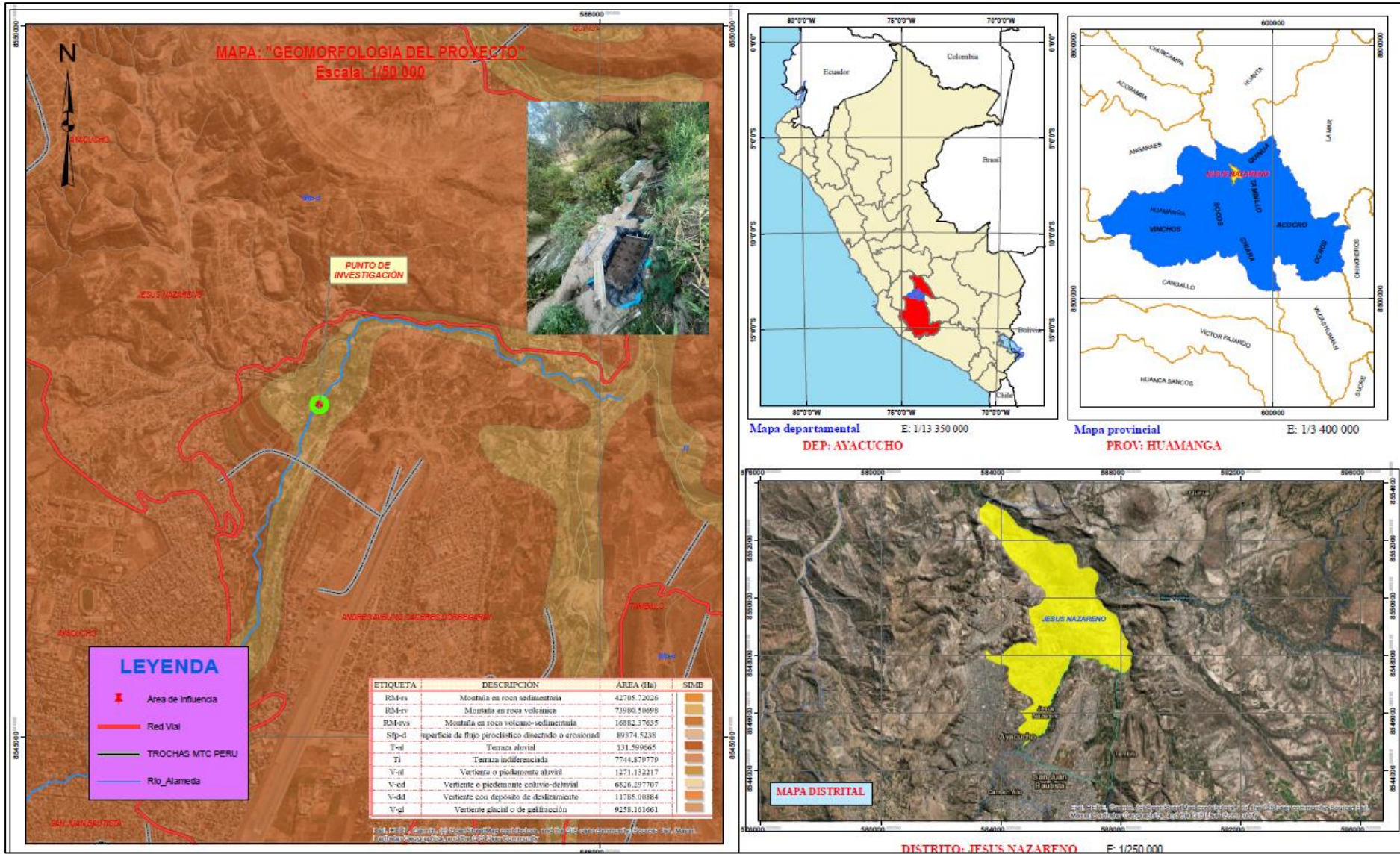


Figura 9.

Mapa de la Fisiografía del punto de investigación

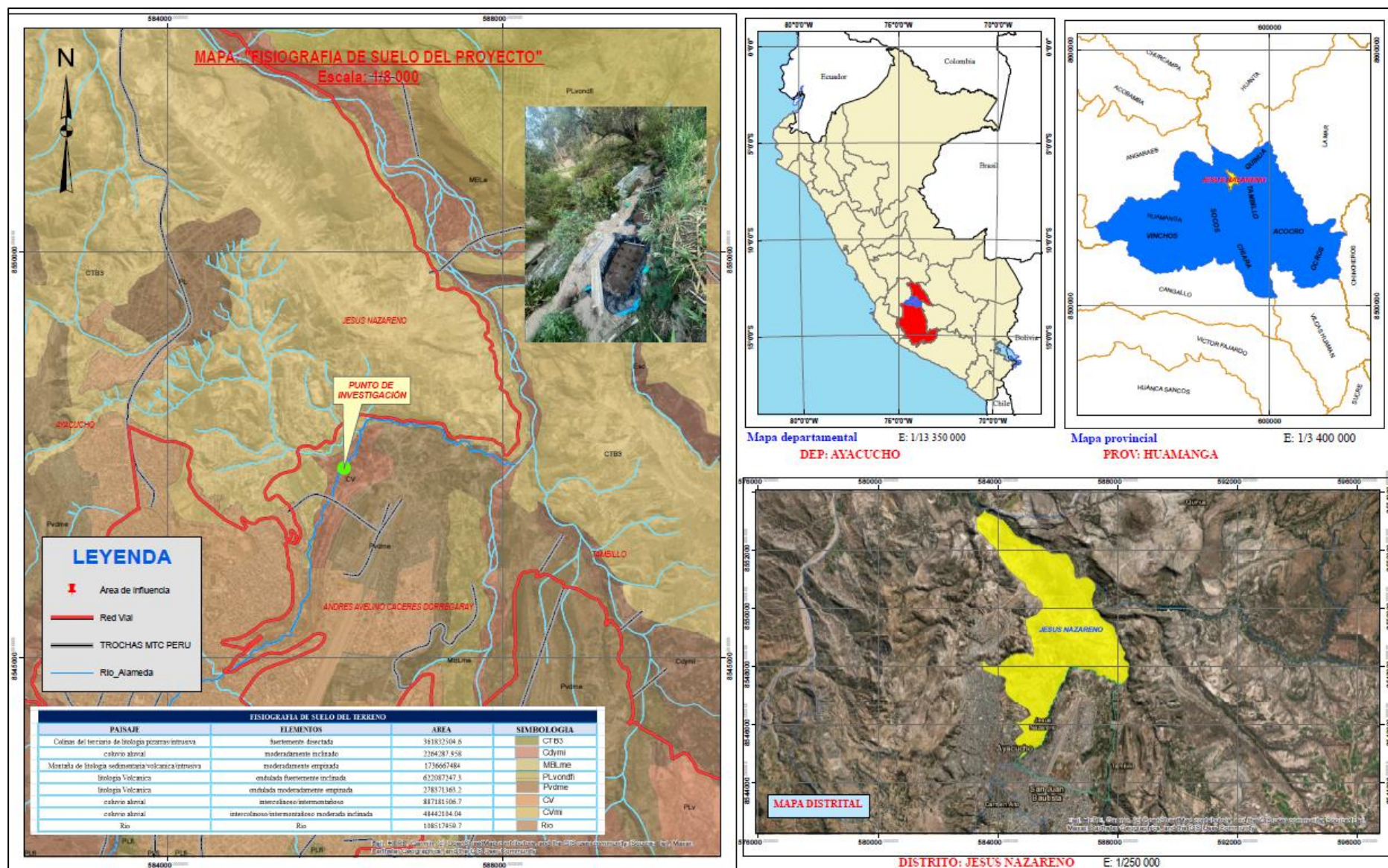


Figura 10.

Mapa de uso actual de los suelos en el punto de investigación

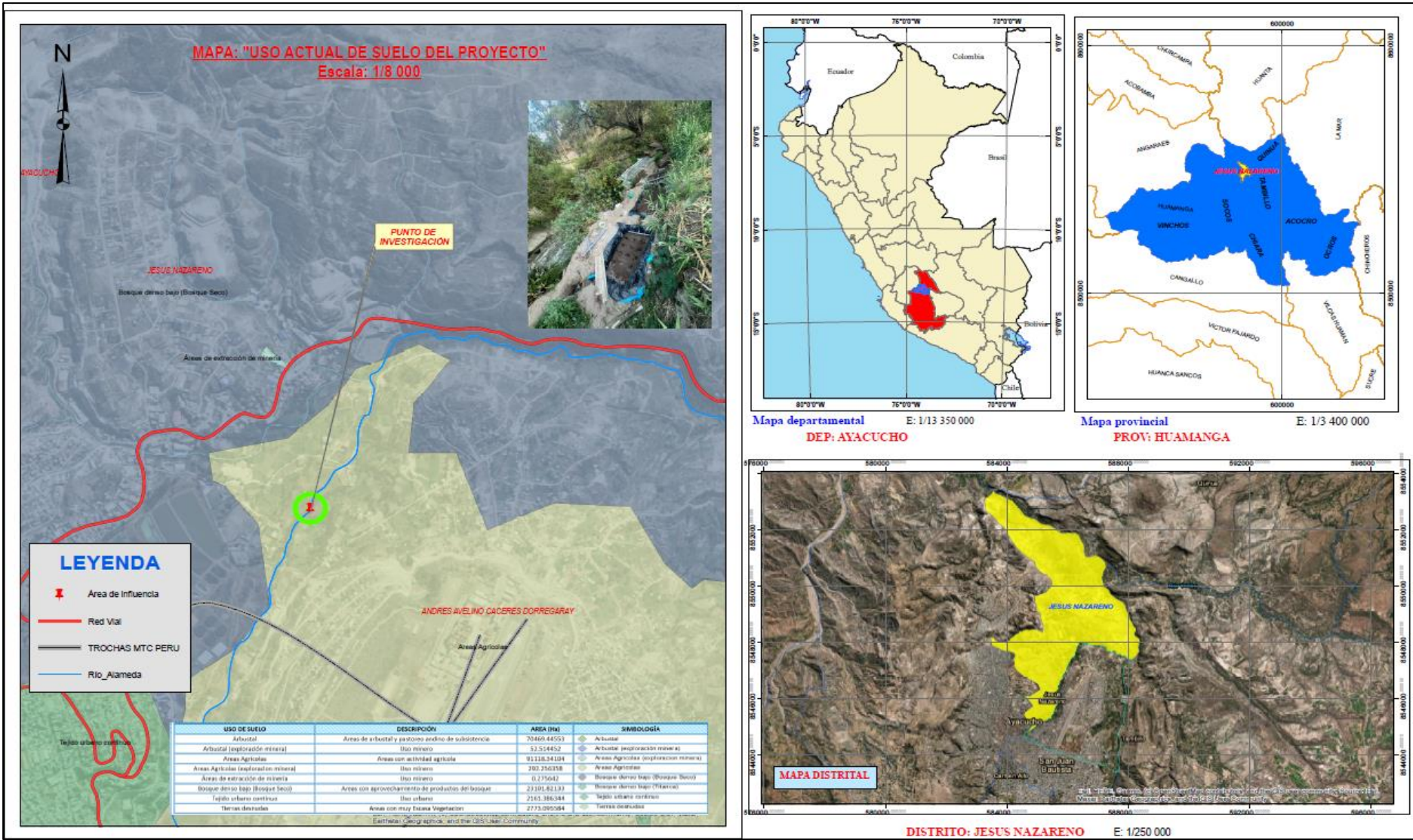
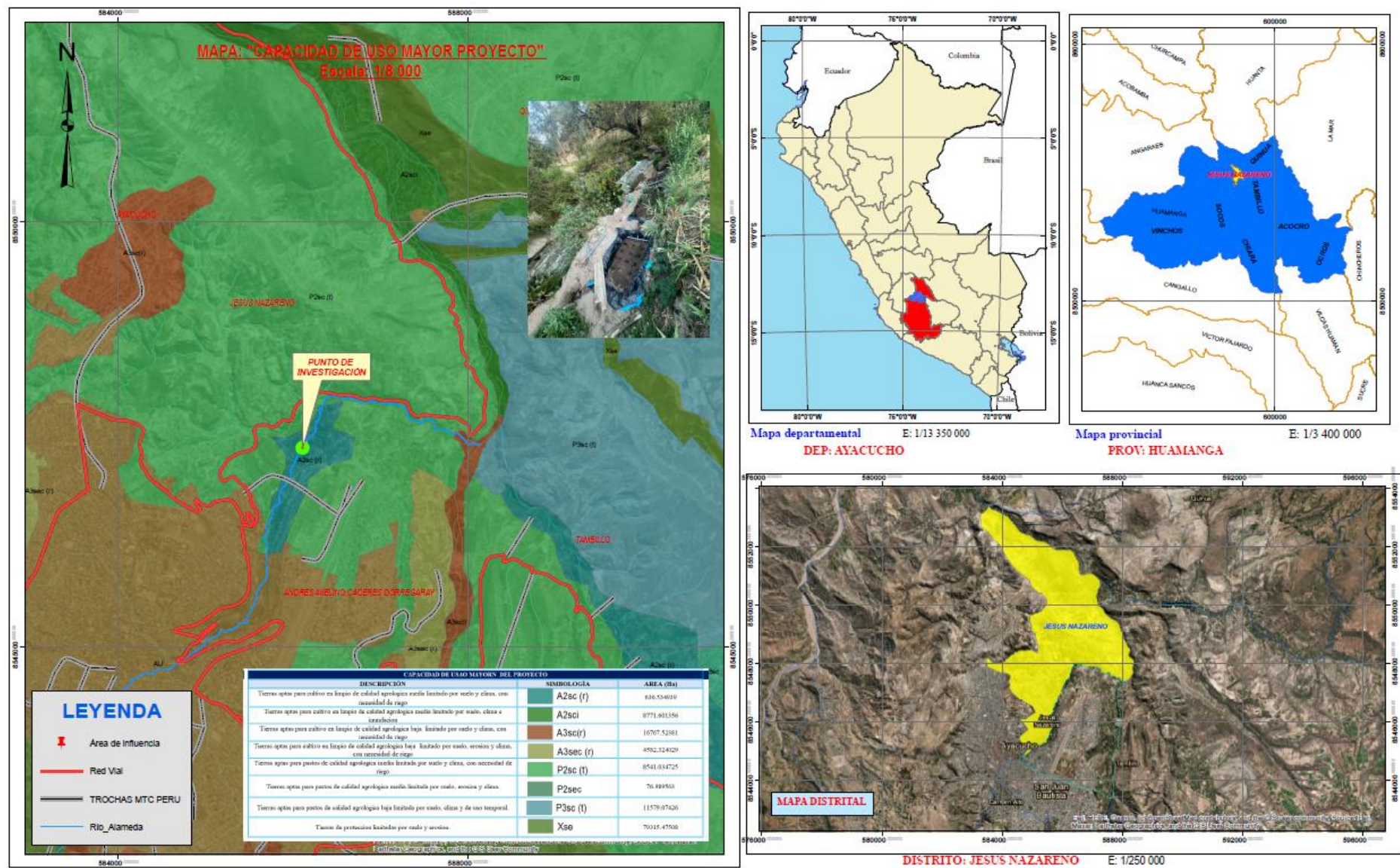


Figura 11.

Mapa de la Capacidad de uso mayor del suelo en el punto de investigación



2.3.1.2. Diagnostico actual de la zona de Intervención

En la actualidad se observó un nivel considerable de deterioro del medio ambiente, caracterizado por alteraciones de tipo físico, químico y microbiológico, asociadas a la acumulación de contaminantes provenientes de actividades urbanas y domésticas. Durante la evaluación en campo y las inspecciones iniciales realizadas, se reconocieron diversas condiciones ambientales, las cuales fueron documentadas de acuerdo con la información mostrada en la Figura 12.

Figura 12.

Contaminación en el río Alameda



Nota. Fotografía tomada en el reconocimiento de campo, captación realizada por acumulación de materiales no degradables.

La caracterización se basó en observaciones directas en campo.

- Presencia de aguas residuales domesticas sin tratamiento: Son descargadas constantemente desde las viviendas y conexiones informales, desembocando en las orillas del río Alameda.
- Acumulación de residuos sólidos: En el reconocimiento en campo se observó residuos sólidos como; plásticos, telas, envases y desechos orgánicos
- Coloración oscura y alta turbidez: Se registra en todo el tramo donde se intervino.

- Olores desagradables: Se observa desembocaduras de desagüe a orillas del río, y frente al punto de intervención. Indicando un proceso avanzado de descomposición orgánica.

Durante las visitas de campo realizadas se identificaron los siguientes aspectos:

- Calidad del agua deteriorada: El agua presentó características propias de contaminación orgánica y microbiológica, evidenciadas por la presencia visible de material flotante, elevada turbidez y olores característicos de procesos de descomposición. Estos indicios fueron consistentes con concentraciones elevadas de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y coliformes, parámetros considerados críticos para la evaluación de la calidad del agua.
- Aportes constantes de aguas residuales domésticas: A lo largo del tramo evaluado se identificaron conexiones informales que descargaron directamente al cauce, generando incrementos puntuales en la carga contaminante. Estas descargas explicaron el deterioro progresivo de la calidad del agua y sustentaron la necesidad de implementar un sistema de tratamiento complementario, como el humedal artificial.
- Alteraciones físicas del cauce: Se identificaron zonas de sedimentación irregular, compactación de las márgenes y presencia de residuos sólidos que obstaculizaron parcialmente el flujo del agua. Estas condiciones influyeron en la dinámica hidráulica del cauce y representaron un riesgo para la dispersión de contaminantes.

2.3.2. Análisis del punto de intervención

2.3.2.1. Selección del punto de intervención

La selección del lugar de intervención se realizó mediante una inspección directa en el río Alameda, localizando un área que reúne las condiciones apropiadas para la instalación y el funcionamiento de un humedal artificial. La zona seleccionada se localizó en un tramo donde el cauce presentó una pendiente suave y un flujo de agua relativamente constante.

Durante el proceso de inspección se consideraron diversos criterios prácticos, entre los cuales destacó la facilidad de acceso al sitio. En los alrededores del área evaluada se identificaron parcelas con vegetación destinada al consumo humano, lo que permitió

disponer de un espacio adecuado para la implementación de los humedales artificiales, así como la proximidad a zonas con mayor impacto por descargas residenciales.

Esta condición permitió que el sitio seleccionado representara de manera adecuada la calidad del agua del río Alameda, dado que la línea de conducción hacia el prototipo de desarenador fue aprovechada mediante una zanja sin revestimiento utilizada por los propietarios de las parcelas para riego. En este contexto, el punto de intervención seleccionado permitió evaluar la efectividad del humedal artificial en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y los coliformes.

Finalmente, el lugar seleccionado proporcionó un terreno estable, accesibilidad para el transporte de materiales y condiciones apropiadas para realizar el control y seguimiento del sistema durante todo el periodo de evaluación.

2.3.2.2. Riesgos y condiciones del punto de intervención

En la figura 13, se muestran las condiciones aguas arriba del punto de intervención seleccionado en el río Alameda, las cuales presentaron características físicas y ambientales que debieron ser consideradas para asegurar la correcta instalación y funcionamiento del humedal artificial. Durante la inspección de campo se identificaron diversos aspectos relevantes que influyeron en la planificación y diseño del sistema de tratamiento propuesto.

Figura 13.

Condiciones ambientales del punto de intervención



Nota. Fotografía tomada aguas arriba del punto de investigación.

- ***Condiciones del punto de intervención***

- Estabilidad del terreno: De acuerdo a los mapas realizados en el diagnóstico, el área presenta un suelo predominantemente limoso-arenoso, con capacidad de excavación favorable para la instalación del humedal subsuperficial y superficial. Se observaron procesos activos de deslizamiento y socavación lateral directa.
- Régimen de caudal observable: Si bien no se realizó un estudio hidráulico formal, el caudal del tramo se mantuvo estable durante las visitas de campo, sin presencia de incrementos bruscos. Esto facilita la captación controlada del flujo contaminado hacia el humedal.
- Calidad del agua inicial: El tramo presentó indicadores de contaminación asociados a descargas domésticas, lo que justifica la intervención. Se observaron olores, turbidez elevada y presencia de sólidos suspendidos, condiciones adecuadas para evaluar la eficiencia del humedal.

- ***Riesgos identificados***

- Crecidas estacionales: Durante épocas de lluvias existe la posibilidad de aumento del nivel del río y desbordes laterales que podrían afectar la estructura del humedal. Para mitigar este riesgo se considerará una elevación mínima del bordo libre y protección con material granular.
- Erosión en la ribera: Si bien no se observó erosión activa en el punto exacto, sectores próximos presentan socavación intermitente durante lluvias. Esto puede generar inestabilidad si no se protege adecuadamente la zona de entrada y salida del humedal.
- Sedimentación: El arrastre de sólidos finos en temporada lluviosa podría obstruir la estructura de entrada o disminuir la conductividad hidráulica del humedal subsuperficial.
- Vandalismo o intervención humana: La cercanía con la población supone riesgo de manipulación no autorizada del sistema, eliminación de plantas y obstrucción de la entrada del caudal.
- Descargas adicionales no controladas: Existe riesgo de que nuevas conexiones clandestinas aumenten la carga orgánica repentinamente, afectando el rendimiento del sistema.

2.3.3. Criterio de diseño

El predimensionamiento del humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial se realizó considerando los criterios técnicos establecidos en la Norma Técnica OS.090 "Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), complementados con los criterios de diseño propuestos por Kadlec y Wallace (2009), Vymazal (2010) y Crites y Tchobanoglous (2000), debido a que la Norma OS.090 establece criterios generales para plantas de tratamiento, mientras que el dimensionamiento específico de humedales artificiales se desarrolla mediante metodologías internacionalmente aceptadas.

Para el dimensionamiento se consideraron como variables de diseño el caudal promedio de tratamiento (Q), la demanda bioquímica de oxígeno afluente (DBO₅), el tiempo de retención hidráulica (TRH), la carga hidráulica superficial, la carga orgánica, la porosidad del medio filtrante, la profundidad útil del humedal, la conductividad hidráulica del sustrato y las dimensiones geométricas del sistema. La selección de estos parámetros permitió garantizar un adecuado tiempo de contacto entre el agua residual, el medio granular, la vegetación y los microorganismos responsables de los procesos de depuración.

Al principio, las metodologías empleadas para el dimensionamiento de humedales se fundamentaban en la carga superficial de los parámetros de diseño seleccionados. Estas consideraban las concentraciones del afluente y del efluente para establecer una carga superficial máxima, a partir de la cual se determinaba el área de tratamiento requerida. (Camilo Iván, 2021)

Tabla 5.

Carga superficial para humedales de flujo superficial y subsuperficial

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)		Meta de tratamiento del efluente (mg/L)		Carga superficial contaminante (kg/Ha-día)	
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
DBO	5 a 100	30 a 175	5 a 30	10 a 30	10 - 100	67 - 157
SST	5 a 100	30 a 150	5 a 30	10 a 30	10 - 112	45 - 168
NH ₃ /NH ₄	2 a 20	30 a 150	1 a 10	10 a 30	1 - 4,5	45 - 168
NO ₃	2 a 10	2 a 10	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 13,5
Nitrógeno total	2 a 20	2 a 40	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 12,3
Fósforo total	1 a 10	1 a 10	0,5 a 3	0,5 a 3	1 - 4,5	1 - 4,5

Fuente: Adaptado de EPA, 2000a y Rabat Blázquez, 2016, p. 36

Posteriormente, las metodologías aplicadas al dimensionamiento de humedales artificiales incorporaron ecuaciones fundamentadas en la biocinética de los procesos de remoción que tienen lugar dentro de estas estructuras. Dichas expresiones incluyeron parámetros específicos de cálculo para cada tipo de humedal artificial, considerando factores como la profundidad, la porosidad, la profundidad de las raíces y la temperatura, entre otros.

2.3.3.1. Metodología de Reed

La metodología propuesta por Reed se basa en determinar el área requerida para reducir la concentración inicial de un contaminante hasta alcanzar una concentración objetivo, de acuerdo con las exigencias establecidas para el vertido final. Para ello, se estima el área necesaria destinada a la remoción de contaminantes como la DBO, nitrógeno total, fósforo y sólidos totales.

$$As = \frac{Ln \frac{Co}{Ce} * Q}{Kt * d * n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

As: Área superficial del humedal (m²)

Ln: Logaritmo natural de la relación entre concentración afluente y efluente (adimensional)

Co: Concentración del contaminante del afluente (mg/L)

Ce: Concentración del contaminante del efluente (mg/L)

Q: Caudal de diseño (m³/día)

Kt: Constante a la temperatura del agua residual (días⁻¹)

d: Profundidad del humedal (m)

n: Porosidad del medio (adimensional)

- Kt corresponde a una constante de reacción de primer orden que depende de la temperatura, expresada en unidades de día⁻¹ (d⁻¹), y puede determinarse mediante la siguiente expresión.

$$Kt = K(20) * \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

-Kt : Constante de remoción

- K_{20} : Constante del agua a 20 °C
- $\theta = 1.057$ coeficiente empírico
- T : Temperatura del agua residual (°C)

- T representa la temperatura promedio del agua durante la operación del sistema (°C), θ corresponde al coeficiente de temperatura referido a 20 °C y K_{20} es la constante determinada para una temperatura de 20 °C, expresada en unidades de día⁻¹ (d⁻¹). Los valores característicos asociados a estas constantes representan parámetros de diseño utilizados en la formulación y ajuste de los modelos cinéticos aplicados al humedal artificial de diferentes autores.

La constante cinética representa la velocidad de remoción de la materia orgánica en el humedal artificial. Su valor depende de la temperatura del agua, por lo que fue corregida mediante el factor de temperatura propuesto por Kadlec y Wallace (2009), considerando las condiciones ambientales del área de estudio.

Tabla 6.

Coeficiente de velocidad de reacción de la DBO

Criterio	Descripción	Coeficiente
Estándar de laboratorio	Ensayos convencionales de DBO de laboratorio.	El rango de valores de k_{20} para efluentes de procesos de tratamiento biológico es de 0.12 a 0.23 d ⁻¹

Fuente: Elaboración propia en base a APHA (1999), Metcalf & Eddy (2014), Phelps (1944).

En la tabla 6, se menciona al coeficiente de velocidad de reacción de la DBO. El rango de valores de k_{20} para efluentes de procesos de tratamiento biológico es de 0.12 a 0.23 d⁻¹. Para un agua residual determinada, el valor de k_{20} a 20°C puede determinarse experimentalmente observando la variación en el tiempo del oxígeno disuelto en una serie de muestras incubadas. (Metcalf & Eddy, 2014)

Se ha determinado que el coeficiente de temperatura presenta valores de aproximadamente 1.057 para temperaturas entre 20 y 30°C, mientras que en el rango de 4 a 20°C puede alcanzar 0.23. Aunque en muchos estudios se utiliza el valor 1.047, se ha comprobado que este no representa adecuadamente el comportamiento a bajas temperaturas, especialmente por debajo de 20°C (Metcalf & Eddy, 2014)

La tabla 7 se recopiló el dato para el parámetro θ que representa la variación de la velocidad de reacción frente a cambios térmicos y permite corregir la constante cinética de remoción respecto a la temperatura estándar de 20 °C. Su uso contribuye a obtener estimaciones más representativas del comportamiento real del sistema bajo condiciones de operación específicas. (Kadlec & Wallace, 2009)

Tabla 7.

Parámetro de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial

Parámetro	KA20 (m/año)	θ	Concentración de fondo, C, mg/L
DBO	117	1.057	3
SST	43.4	1	6
Nitrógeno orgánico	35	1.05	1.5
Nitrógeno amoniacal	34	1.05	0
Nitrógeno NOx	50	1.05	0
Nitrógeno total	10	1.05	1.5
Fosforo total	9.1	1.09	0
Coliformes totales	100	1.003	200 UFC/100 MI

Fuente. Tomado de *Treatment Wetlands* (2.^a ed.), por R. H. Kadlec y S. D. Wallace, 2009.

2.3.3.2. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Tiempo necesario para que el agua permanezca dentro del sistema. Un TRH adecuado favorece la sedimentación, degradación biológica y filtración. Se muestra en la formula siguiente, definido considerando el caudal de ingreso y el volumen útil del humedal. Los cálculos realizados se muestran en los anexos.

$$TRH = \frac{Ln \frac{Co}{Ce}}{Kt}$$

Ecuación 6

Donde:

Co: Concentración del contaminante del afluente (mg/L)

Ce: Concentración del contaminante del efluente (mg/L)

Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días⁻¹)

En los humedales artificiales, el tiempo de retención hidráulico puede variar según el tipo de sistema. En los humedales de flujo subsuperficial generalmente se encuentra en un rango de 3 a 14 días.

2.3.3.3. Carga contaminante de entrada

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) fue considerada como el principal parámetro de diseño del humedal artificial, debido a que la concentración establecida para el efluente se encuentra definida en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobados mediante Decreto Supremo. La selección de este parámetro se fundamenta en su importancia como indicador de la carga orgánica biodegradable y en su influencia directa sobre los criterios de diseño del sistema.

En la tabla 8, el valor límite adoptado para el efluente permitió establecer la meta de calidad del agua tratada y orientar el dimensionamiento del humedal, influyendo en la determinación de variables como la constante cinética de remoción, el tiempo de retención hidráulico y el área superficial requerida. De esta manera, el diseño fue desarrollado considerando el cumplimiento de las disposiciones normativas vigentes y las condiciones necesarias para garantizar la calidad esperada del efluente tratado.

Tabla 8.

Parámetro de riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Agua para riego no restringido	D2: Bebida de animales
FÍSICOS – QUÍMICOS			
Aceites y Grasas	mg/L	5	10
Bicarbonatos	mg/L	518	**
Cianuro Wad	mg/L	0,1	0,1
Cloruros	mg/L	500	**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)
Conductividad	μS/cm	2 500	5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40	40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2	0,5
Fenoles	mg/L	0,002	0,01
Fluoruros	mg/L	1	**
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N) + Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	100	100
Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	10	10

Fuente. Adaptado de Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017.

2.3.3.4. Vegetación

El criterio empleado para la selección y evaluación de la vegetación se basó en la metodología propuesta en el marcaje de plantaciones por Carbo Gomez & Vidal Marco, (1978), utilizando las formulaciones planteadas por dicho autor como referencia para estimar la influencia y el desempeño de las especies vegetales dentro del humedal artificial, ecuación 2.

$$NP = \frac{S}{A * 0.866}$$

Donde:vv

NP : Número de plantas

S : Superficie a sembrar

A : Área ocupada por la planta

La aplicación de este enfoque permitió considerar parámetros asociados al comportamiento de la vegetación y su participación en los procesos de remoción de contaminantes, debido a la relevancia que las plantas tienen en la dinámica y eficiencia del sistema de tratamiento. La adopción de esta metodología se sustenta en su utilización como herramienta técnica para el análisis y diseño de humedales artificiales.

2.3.4. Diseño hidráulico

2.3.4.1. Determinación del caudal de diseño

En primer lugar, se determinó el caudal de diseño en función de las necesidades experimentales del estudio. Se estableció un caudal de ingreso constante que permitió garantizar condiciones homogéneas durante el periodo de evaluación.

- Caudal de ingreso (Q): Para el dimensionamiento del sistema, se determinó caudal de ingreso mediante el método volumétrico, utilizando un balde de volumen conocido y un cronómetro, técnica empleada comúnmente en evaluaciones hidráulicas de campo por su simplicidad y confiabilidad. El procedimiento consistió en captar el flujo directamente en el balde y registrar el tiempo necesario para llenarlo completamente. Usando la ecuación 3.

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

Donde:

Q: Caudal volumétrico de ingreso (m^3/s)

V: Volumen del balde o recipiente utilizado en el aforamiento (m^3)

T: Tiempo necesario para llenar el recipiente completamente (s)

Este método permite estimar de manera rápida el caudal real del flujo, especialmente en conducciones pequeñas, canales rústicos o puntos donde no es posible instalar equipos de medición más precisos.

Figura 14.

Aforamiento de caudal para el pre dimensionamiento



Nota. Se optó por este método por el tema de su fácil cálculo, realizado con todas las precauciones del caso del río contaminado en extremo.

Seguidamente, se establecieron los parámetros de diseño, tales como el tiempo de retención hidráulica, la profundidad del lecho filtrante y la carga hidráulica aplicada. Estos criterios permitieron asegurar un adecuado funcionamiento del sistema durante la investigación.

2.3.4.2. Diseño del humedal

Se realizó la toma de muestras para obtener las concentraciones iniciales de DBO₅, DQO, SST y coliformes termo tolerantes presentes en el agua captada.

Posteriormente, se realizó la caracterización del afluente a tratar según las normativas puestas en los anexos, analizándose parámetros fisicoquímicos relevantes como la

demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales y pH. Estos valores sirvieron como base para el diseño del sistema.

Seguidamente, se determinaron las dimensiones del sistema (largo, ancho y profundidad) en función del caudal definido y los parámetros establecidos, garantizando un flujo uniforme y condiciones apropiadas para el tratamiento.

- Corrección de la constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})

Se realiza la corrección de la constante con la temperatura, la constante de velocidad de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fue determinada a partir de los valores experimentales de DBOs obtenidos mediante la temperatura a 20 °C.

En la tabla 6 nos indica el constante coeficiente de velocidad de reacción de la DBO, según la literatura mencionada las aguas residuales con tratamientos previos en concentraciones bajas, teniendo en cuenta que se tuvieron remociones previas se opta por usar dicho dato de 0.230. Asimismo, es adoptada como referencia para el cálculo de $K(20)$.

A partir de estos datos, se estimó la constante k a condiciones estándar y posteriormente se realizó su corrección en función de la temperatura del sistema, considerando un coeficiente de temperatura (θ) del ambiente donde se interviene la investigación.

Figura 15.

Toma de muestra de temperatura del agua.



Nota. Medición de la temperatura de una muestra de agua mediante un termómetro digital portátil durante trabajo de campo.

En primer lugar, se tomó como dato base la constante cinética a condiciones estándar, es decir, $K_{20} = 0.23 \text{ día}^{-1}$ a 20 °C . Luego, se consideró la temperatura del agua del sistema como se muestra en la figura 15, la cual fue de 19.80 °C . A partir de estos valores, se aplicó el factor de corrección por temperatura, utilizando un coeficiente θ típico para aguas residuales domésticas. El cálculo se realizó mediante la siguiente relación:

$$Kt = K(20) * \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})

- Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})

- K_{20} : Constante del agua a 20 °C

- $\theta = 1.06$ coeficiente empírico (Tabla 5)

- T : Temperatura del agua residual (°C)

Para el cálculo de la constante cinética ajustada por temperatura correspondiente a la DBO, se adoptó un valor de θ igual a 1.057, de acuerdo con los valores de referencia reportados para humedales artificiales de flujo subsuperficial en la tabla 5. La selección de este coeficiente se fundamenta en que la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno depende principalmente de procesos microbiológicos sensibles a la temperatura.

Finalmente, se obtuvo un valor de $K_t = 0.227 \text{ día}^{-1}$, lo cual indica un incremento en la velocidad de degradación de la materia orgánica debido al efecto de la temperatura, reflejando condiciones más favorables para la actividad biológica dentro del humedal artificial.

- **Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)**

Para el cálculo del TRH se empleó la metodología basada en los cálculos mencionados anteriormente sobre la cinética de remoción de primer orden utilizada en humedales artificiales, la cual considera la concentración del contaminante de entrada y salida, así como la constante cinética corregida por temperatura. A partir de la constante de reacción corregida (Kt), se estimó el tiempo requerido para alcanzar la concentración objetivo del efluente utilizando la ecuación 6.

El valor obtenido para el diseño fue de 6.15 días, indicando que el agua residual debe permanecer aproximadamente ese periodo dentro del humedal para lograr la reducción esperada de DBO. Con esta metodología se obtiene el tiempo real de permanencia del flujo dentro del sistema, parámetro utilizado para verificar la capacidad hidráulica y la eficiencia del humedal diseñado.

- **Área superficial del humedal (m²)**

Superficie requerida para lograr la remoción de contaminantes según el TRH como se muestra en la tabla 8, previos cálculos realizados que se muestran en los anexos. El área se distribuyó entre las dos unidades del sistema el humedal superficial y el subsuperficial.

Previo al cálculo se define una profundidad promedio que permita el crecimiento adecuado de micrófitos y el flujo subsuperficial. Generalmente se considera entre 0.30 y 0.60 m para sistemas subsuperficiales y hasta 0.40 m para superficiales. Pero en este caso y según el diseño realizado en Excel se optó por 0.60 m

El cálculo del área superficial se realizó empleando la ecuación 4 para humedales artificiales, la cual relaciona el caudal de diseño, la concentración inicial y final del contaminante, y la constante cinética corregida por temperatura. Esta metodología permite estimar la superficie necesaria para que los procesos físicos, químicos y biológicos ocurran durante el tiempo de permanencia del agua dentro del sistema.

$$As = \frac{Ln \frac{Co}{Ce} * Q}{Kt * d * n}$$

En cuanto a la porosidad del medio filtrante, este parámetro fue determinado mediante ensayos de laboratorio realizados al material seleccionado, cuyos resultados se presentan en el anexo correspondiente, teniendo como dato 0.436. La utilización de valores obtenidos experimentalmente permitió fundamentar el diseño en propiedades reales del material disponible localmente, incrementando la precisión en el cálculo del volumen efectivo y del tiempo de retención hidráulico del sistema.

Como resultado del procedimiento de cálculo, se obtuvo un área superficial de 23.686 m², valor que fue utilizado para definir las dimensiones geométricas del humedal y posteriormente establecer su longitud y ancho de diseño.

- **Dimensiones geométricas del humedal**

Para el diseño del humedal artificial se establecieron criterios hidráulicos y operacionales orientados a garantizar un funcionamiento eficiente del sistema y una adecuada remoción de contaminantes.

En primer lugar, se definió una relación larga/ancho (L/A) con el propósito de promover un flujo direccional uniforme dentro de la celda y minimizar la aparición de cortocircuitos hidráulicos que pudieran reducir el tiempo efectivo de contacto entre el agua residual y los componentes del sistema. Esta relación geométrica permite optimizar la distribución del flujo y favorecer las condiciones necesarias para los procesos de tratamiento.

Asimismo, se consideró una pendiente ligera en el fondo del humedal, comprendida entre 0.5 % y 1 %, con el fin de facilitar el desplazamiento del agua por gravedad a través del sistema. La incorporación de esta pendiente contribuye a mantener un flujo continuo, evitando estancamientos y reduciendo el riesgo de erosión o alteraciones en la estructura del humedal.

Por otra parte, se definieron los niveles de entrada y salida considerando diferencias mínimas de elevación que permitan la circulación continua del agua mediante flujo gravitacional, evitando la necesidad de implementar sistemas de bombeo. Este criterio facilita el control del tiempo de permanencia del agua dentro del humedal y mejora la estabilidad operativa del sistema.

Finalmente, el diseño fue orientado hacia el cumplimiento de un criterio de remoción esperado, buscando alcanzar reducciones significativas en parámetros de calidad como la DBO_5 , DQO, SST y coliformes. Para ello, se tomaron como referencia tasas de remoción reportadas para humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, las cuales permitieron establecer parámetros de diseño acordes con el nivel de tratamiento requerido.

- **Selección del medio filtrante**

A continuación, se definió la configuración hidráulica del humedal, estableciéndose la pendiente del fondo, así como la ubicación de las estructuras de entrada y salida. Se aseguró una distribución homogénea del flujo a través del medio filtrante.

Seguidamente, se seleccionaron los materiales del lecho filtrante, empleándose grava de diferentes granulometrías. Se definieron los espesores de cada capa, garantizando adecuada permeabilidad y soporte.

El material filtrante comprende el tipo de grava, arena y suelo de terreno natural para conformar el sustrato. Lo cual garantiza la permeabilidad adecuada, estabilidad estructural y soporte para las raíces de las plantas.

- **Vegetación (micrófitos)**

Se seleccionaron especies con alta tolerancia a aguas residuales y capacidad de transferencia de oxígeno a la rizosfera. Las especies definidas para el sistema fueron aquellas presentes de forma natural en el entorno del río Alameda *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, usando la ecuación 2:

$$NP = \frac{S}{A * 0.866}$$

Donde:

- NP : Número de plantas
- S : Superficie a sembrar
- A : Área ocupada por la planta

A continuación, se presenta una tabla resumen que integra los principales parámetros y cálculos realizados para el diseño del sistema. En la tabla 8, se incluyen los valores determinados para variables hidráulicas, geométricas y operacionales, tales como el caudal de diseño, constante cinética ajustada por temperatura, tiempo de retención hidráulico, área superficial requerida, dimensiones del humedal y demás criterios considerados.

Tabla 9.*Variables de diseño para el dimensionamiento del humedal artificial*

HUMEDAL SUBSUPERFICIAL			
Datos			
Caudal de diseño (m ³ /día)		2.016	
Número de unidades		2	
Caudal por unidad (m ³ /día)	Q	1.008	
Temperatura (°C)	T	19.80	
DBO Afluente (mg/l)	Co	60.66	
DBO Efluente (mg/l)	Ce	15	
Eficiencia de remoción		0.753	
Constante para 20 °C	K20	0.23	
Altura adoptada	d	0.6	0.3 - 1
Porosidad del medio	n	0.436	
Pendiente	S	0.005	

Fuente: Datos tomados de los cálculos realizados y muestras.

Para el dimensionamiento del humedal subsuperficial se consideró un caudal de diseño total de 2.016 m³/día, el cual fue distribuido en dos unidades, obteniéndose un caudal de 1.008 m³/día por unidad. La meta de tratamiento se estableció en función de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), previo análisis en laboratorio tomando como valores de entrada y salida 60.66 mg/L y 15 mg/L, respectivamente.

Tabla 10.*Dimensionamiento del humedal artificial de acuerdo a los parámetros de diseño requeridos*

Dimensionamiento cada unidad			
Remoción de DBO			
Constante corregida con temperatura DBO	Kt	0.227	
Tiempo de retención hidráulico calculado (día)	Día0	6.15	
Area superficial	As	23.686	m ²
Rectangular			
Relación larga: ancho		2	
Ancho de humedal	Anc	3.4	m
Largo de humedal	L	6.9	m
Tiempo de retención hidráulico (día)	t	6.15	
Q comprobación			
Conductividad hidráulica del medio filtrante		4.33	cm/s
Conductividad hidráulica del medio filtrante		3741.12	m ³ /m ² *día
Área de sección transversal		2.06	
	Q	38.624	m³/día

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

Para el diseño del humedal artificial se consideró la remoción de DBO como parámetro principal. La constante de degradación corregida por temperatura fue de $K_t = 0.227 \text{ día}^{-1}$,

lo que permitió determinar un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 6.15 días, adecuado para lograr la eficiencia de depuración requerida.

En función del caudal de $2.016 \text{ m}^3/\text{día}$ y de la constante de remoción, se calculó un área superficial útil de 23.686 m^2 . El humedal se diseñó con una configuración rectangular, aplicando una relación larga: ancho de 2:1, obteniéndose un ancho de 2.43 m y un largo de 4.86 m para cada humedal.

Asimismo, la conductividad hidráulica del medio filtrante se estableció según la tabla del anexo incluida en la información del autor FABIÁN HOYOS en 4.33 cm/s , valor que asegura un flujo adecuado a través del sustrato (FABIÁN, 2020).

En base a los parámetros mencionados, el caudal de comprobación (Q) resultante es de $38.624 \text{ m}^3/\text{día}$, verificando la coherencia hidráulica del diseño respecto al TRH y al área calculada.

2.3.4.3. Componentes del sistema

- Captación: Delimitada desde el punto donde el agua es retenida por materiales en aglomeración, tipo una represa, realizada por los vecinos del área de intervención.
- Línea de conducción: Constituida por una zanja de tierra de 50 metros hacia la tubería de ingreso en el prototipo de desarenador.
- Estructura de decantación: Diseñada con el objetivo de que las partículas más densas suspendidas en el agua se depositen en el fondo, permitiendo que el agua circule a la siguiente zona.
- Humedal subsuperficial: Constituida por capas de material granular (piedra chancada, arena gruesa y arena fina), conductos perforados para la distribución del flujo y las plantas *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*.
- Humedal superficial: Constituida por una capa superficial con una pendiente mínima de 0.5% para que el agua circule con una baja velocidad. Luego a ello se contribuye con las plantas *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*.
- Sistema de tuberías: Se usó para asegurar el paso controlado del nivel del agua por los componentes de todo el sistema. Así poder asegurar su eficiencia y para tener mejores resultados en la muestra de pruebas.

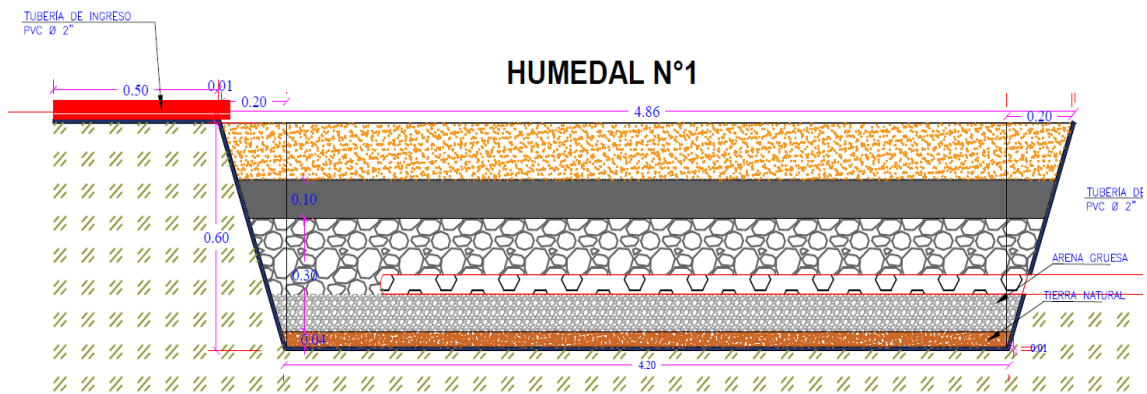
2.3.4.4. Diseño detallado de HSSF

a. Geometría del humedal

El Humedal N.º 1 corresponde a un humedal de flujo subsuperficial horizontal, diseñado con estratificación de materiales filtrantes y un sistema de distribución e ingreso de agua debidamente controlado. El corte transversal muestra que la estructura está conformada por una excavación trapezoidal revestida por capas sucesivas de sustratos, cuya función es permitir la filtración, retención y degradación de la materia orgánica.

Figura 16.

Diseño en perfil del humedal N° 1



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

En la parte inferior de la figura 16, se observa una capa de soporte de grava gruesa, sobre la cual se dispone una red de tubería perforada que actúa como conducto de distribución uniforme del caudal afluente. Por encima de esta capa se coloca grava de menor tamaño y posteriormente una capa superior de material más fino (arena gruesa). Toda la estructura incorpora una geomembrana plástica lateral y de fondo, destinada a evitar infiltraciones hacia el suelo natural y garantizar que el flujo se mantenga dentro del sistema de tratamiento. El sistema de ingreso y salida se tiene por tuberías PVC de 2''.

b. Estructura filtrante

- Grava gruesa
- Grava fina
- Arena

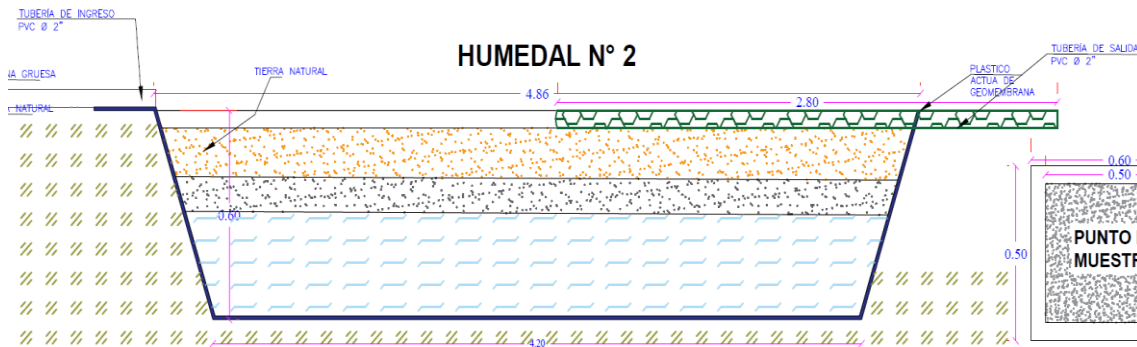
c. Sistema de tuberías

- Tubería de entrada
- Tubería perforada de distribución

- Tubería de salida

Figura 17.

Diseño en perfil del humedal N° 2



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

En la parte inferior de la figura 17, se observa una capa de soporte de grava gruesa, sobre la cual se dispone una red de tubería perforada que actúa como conducto de distribución uniforme del caudal afluente. Por encima de esta capa se coloca grava de menor tamaño y posteriormente una capa superior de material más fino (arena gruesa). Toda la estructura incorpora una geomembrana plástica lateral y de fondo, destinada a evitar infiltraciones hacia el suelo natural y garantizar que el flujo se mantenga dentro del sistema de tratamiento. El sistema de ingreso y salida se tiene por tuberías PVC de 2".

El diseño mostrado garantiza que el flujo del agua se mantenga subsuperficial, de manera que el contacto con el medio filtrante sea continuo, lo cual favorece la remoción de contaminantes como la DBO y sólidos suspendidos. Además, las dimensiones observadas corresponden al área calculada en el dimensionamiento teórico, asegurando el tiempo de retención hidráulico necesario para lograr la eficiencia de remoción estimada.

Figura 18.

Diseño en planta del punto de muestreo.



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

La figura 18, punto de muestreo es una estructura diseñada específicamente para la recolección del humedal subsuperficial. La presencia de una tubería de entrada de PVC de 2" permite dirigir el flujo hacia el punto definido, lo cual asegura que las muestras recolectadas sean representativas del agua que ha pasado por todo el sistema de tratamiento. El diseño rectangular del punto de muestreo, junto con las dimensiones indicadas, facilita el acceso para la toma de muestras y reduce la posibilidad de contaminación externa durante el muestreo. Además, la ubicación del punto de salida al final del humedal garantiza que el agua haya cumplido el tiempo de retención hidráulico establecido en el dimensionamiento teórico, permitiendo evaluar correctamente la eficiencia del sistema.

2.3.5. Construcción del humedal artificial

2.3.5.1. Preparación del terreno

La preparación del terreno comienza con las actividades de desmonte y limpieza del área destinada a la ejecución del proyecto, las cuales tienen como finalidad acondicionar el espacio y garantizar condiciones adecuadas para el desarrollo de las labores constructivas.

Esta etapa comprende la eliminación de la cobertura vegetal existente, incluyendo pastos, arbustos, árboles y cualquier otro elemento que pueda interferir con el proceso de construcción o afectar el correcto funcionamiento del sistema. Asimismo, se contempla el retiro de residuos, material orgánico, piedras y otros obstáculos presentes en el terreno, con el propósito de obtener una superficie despejada y apta para las actividades posteriores. Estas acciones permiten facilitar las labores de replanteo, excavación y construcción, además de contribuir a una adecuada organización y ejecución del proyecto de investigación.

2.3.5.2. Trazo, excavación y nivelación del terreno

Previo análisis, diagnóstico y selección del lugar se efectuó el trazado del área del humedal en función al diseño establecido. Se realizó la nivelación del terreno considerando una pendiente de 0.5 a 1 % que permitió el flujo continuo del agua desde la entrada hasta la salida del sistema.

Una vez delimitada el área, se procedió a la excavación hasta alcanzar una profundidad aproximada de 0.60 m. Se retiró el material excedente y se perfiló el fondo con la finalidad

de darle la forma exacta, las dimensiones precisas y los niveles definitivos establecidos en los planos presentado en los anexos.

2.3.5.3. Impermeabilización e instalación del sistema de entrada

Luego, se realizó la impermeabilización del fondo y paredes del humedal. Para ello, se utilizó geomembrana o una capa de suelo arcilloso compactado, con el objetivo de evitar pérdidas de agua por infiltración.

A continuación, se instaló la tubería de ingreso conectada al sistema de pretratamiento. Se dispuso un sistema de distribución mediante tuberías perforadas, permitiendo una adecuada dispersión del agua residual dentro del humedal.

2.3.5.4. Colocación del material filtrante

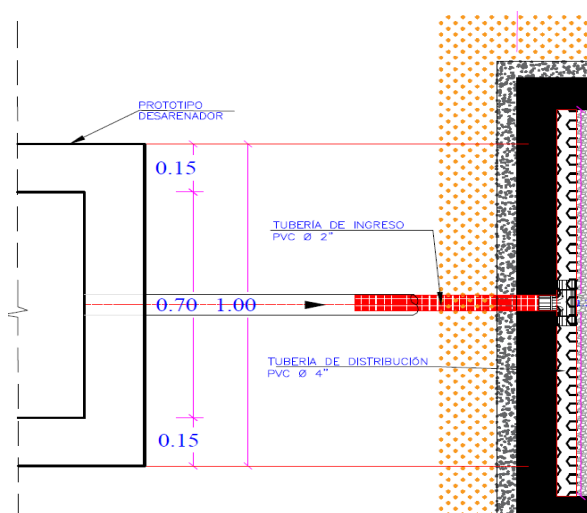
Seguidamente, se procedió a la colocación del material filtrante en capas sucesivas. En la parte inferior se colocó grava gruesa, seguida de una capa de grava media y finalmente una capa de grava fina en la superficie, garantizando condiciones adecuadas para el proceso de filtración.

2.3.5.5. Instalación del sistema de salida

Posteriormente, se implementó el sistema de salida en el extremo opuesto del humedal. Se instaló una tubería de drenaje con un dispositivo de control de nivel, lo cual permitió regular la altura del agua dentro del sistema.

Figura 19.

Instalación del sistema de tuberías de salida en el humedal N° 1



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

Una vez finalizada la estructura, se procedió a la plantación de especies vegetales *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*. Estas fueron distribuidas uniformemente sobre la superficie del material filtrante.

Figura 20.

*Plantación de la semilla de nombre científico *Canna tuerckheimii**



Nota. Fotografía tomada en el punto de investigación.

Se realizó una distribución de acuerdo al área de cada humedal, por lo que se requirió de 25 a 27 plantas por humedal. Se realizó el cálculo de densidad de campo por el método de siembra a tres bolillos. Las plantas se recolecto de los alrededores del punto de intervención, ya que cada uno de ellos se encontraba alrededor.

2.3.6. Toma de muestras y análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

2.3.6.1. Puntos y periodos de muestreo.

Se estableció un único punto de muestreo denominado Punto 01, ubicado en el área de intervención sobre el río Alameda. La evaluación se realizó en dos etapas:

- **Muestra pre-tratamiento:** recolectada el 30 de septiembre de 2025, antes de la entrada del agua al sistema de humedales, representando las condiciones iniciales del agua residual captada.
- **Muestra post-tratamiento:** recolectada el 13 de noviembre de 2025, a la salida del Humedal N°2, en la estructura de punto de muestreo diseñada específicamente para este fin (Figura 18).

2.3.6.2. Procedimiento de recolección y preservación de muestras.

El muestreo fue de tipo puntual, realizado a las 17:00 horas en condiciones de flujo estable. Se emplearon los siguientes recipientes según el tipo de parámetro:

- Frascos de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 litro para parámetros físico-químicos (DBO₅, DQO, SST, OD, nitrógeno total, fósforo total, turbiedad, conductividad y pH).
- Frascos de vidrio estériles de 250 mL para el análisis microbiológico de coliformes termo tolerantes.

Las muestras fueron preservadas bajo refrigeración a 4 °C en cooler térmico con hielo en gel y transportadas al laboratorio dentro de las 24 horas posteriores a su recolección, cumpliendo con la cadena de custodia establecida por el laboratorio acreditado.

2.3.6.3. Parámetros evaluados y métodos analíticos.

Los análisis fueron realizados por el laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C. (SAG), acreditado ante el INACAL-DA (Sede Lima 1) e IAS-829, ubicado en Av. Naciones Unidas N° 1565, Lima – Perú. Los métodos empleados corresponden a las metodologías estándar SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 24.^a edición (2023), conforme a los Informes de Ensayo N° 1913004-2025, 1913051-2025, 1914899-2025 y 1914912-2025.

En la tabla 11 se detallan los parámetros evaluados, el método aplicado, la unidad de medida y el límite de cuantificación correspondiente.

Tabla 11.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados y métodos analíticos

Parámetro	Tipo	Método SMEWW	Unidad	L.C.
pH	Físico	Part 4500-H ⁺ B	Unid. pH	No aplica
Turbiedad	Físico	Part 2130 B	NTU	0.4
Conductividad	Físico	Part 2510 B	µS/cm	—
DBO ₅	Químico	Part 5210 B	mg/L	2
DQO	Químico	Part 5220 D	O ₂ mg/L	10
OD	Químico	Part 4500-O C	O ₂ mg/L	0.5
Nitrógeno Total	Químico	Part 4500-N C	NO ₃ ⁻ -N mg/L	0.15
Fósforo Total	Químico	Part 4500-P B/E	P mg/L	0.013
SST	Químico	Part 2540 D	mg/L	3
Coliformes Termotolerantes	Microbiológico	Part 9221 E-1	NMP/100mL	1.8

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

2.3.6.4. Resultados de laboratorio

- Resultados obtenidos antes del tratamiento

En la tabla 12, se observa los resultados obtenidos en el análisis del agua residual antes del tratamiento muestran una condición de contaminación considerable. Se observa 5.69 mg/L, muestra que el agua tiene mucho fósforo, más de lo que normalmente debería encontrarse en aguas naturales. El pH medido (7.33) está dentro de un valor normal, ligeramente alcalino. El valor alto del Fósforo indica que el agua podría causar problemas de contaminación, como el crecimiento excesivo de algas. El valor de pH es adecuado para que los microorganismos del humedal trabajen bien y ayuden en el proceso de limpieza del agua.

Tabla 12.

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el pre-tratamiento

RESULTADOS PRETRATAMIENTO		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	60.66
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	191
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	155.4
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	4.6
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	986
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	45
Conductividad	µS/cm	49.72
Phosphorus (fósforo): Total phosphorus (fósforo total)	P mg/L	5.69
pH	Unid. pH	7.33*
Turbiedad	NTU	49.72
Numeración de Coliformes Fecales	NMP/100mL	350*10 ⁶

Fuente. Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

La DBO₅ fue de 60.66 mg/L, el cual indica una elevada presencia de materia orgánica biodegradable.

De igual manera, la DQO alcanzó 191 mg/L, confirmando que existe una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas en el agua. La relación DBO/DQO demuestra que el agua es moderadamente biodegradable, lo cual hace viable su tratamiento mediante humedales artificiales.

El fósforo total, tiene como resultado un valor extremadamente alto de (155.4 mg/L), siendo uno de los principales agentes de contaminación del punto evaluado. Este nivel generar impactos como proliferación de algas y procesos de eutrofización; por lo que la instalación de los humedales artificiales, cumple la función de la retención de nutrientes.

El nitrógeno total, tiene como resultado el valor de 4.6 mg/L, este resultado indica un valor mucho menor que el resultado obtenido del fósforo; este resultado indica que el nitrógeno no es un agente contaminante en la corriente de agua.

Los sólidos suspendidos totales, tiene como resultado el valor de 986 mg/L; este resultado indica una elevada presencia de material particulado y residuos sólidos en la corriente de agua, responsables de la turbidez registrada.

Oxígeno disuelto, tiene como resultado el valor de 45 mg/L, este valor indica que es alto en una corriente de agua; entonces este valor corresponde a una fuente de agua residual, lo que podría deberse a interferencias en la muestra o errores en la medición. Finalmente, la conductividad y la turbidez mostraron valores acordes al nivel de contaminación observado, mientras que la numeración de coliformes fecales fue extremadamente elevada (350×10^6 NMP/100 mL), confirmando la presencia de contaminación de origen doméstico. Esta condición hace necesario un tratamiento biológico como el humedal, que contribuirá a reducir tanto la carga orgánica como los microorganismos patógenos.

En la tabla 10, se observa los resultados después del tratamiento, lo cual permiten realizar una comparación del comportamiento de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual antes y después del tratamiento, evidenciando variaciones significativas asociadas al proceso aplicado. Los ensayos acreditados ante INACAL-DA (Sede Lima 1) evidencian que el tratamiento aplicado al agua residual genera una mejora significativa en parámetros físicos y algunos químicos.

Según las tablas 10 y 11, los Sólidos Suspendidos Totales (TSS) se reducen drásticamente de 986 mg/L antes del tratamiento a 31.23 mg/L después del tratamiento, acompañados por una disminución de la turbiedad de 49.72 NTU a 18 NTU. Asimismo, el Fósforo Total muestra una remoción altamente eficiente, descendiendo de 155.4 mg/L a 5.87 mg/L, lo que indica una reducción importante del potencial eutrofizante del efluente.

- Resultados obtenidos después del tratamiento

Tabla 13.

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el postratamiento

RESULTADOS POSTRATAMIENTO		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	63.75
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	126.7
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	31.23
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	5.87
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	43.28
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	2.1
Conductividad	µS/cm	1051
Turbiedad	NTU	18
pH	Unid. pH	6.84
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	NMP/100mL	280*10 ⁶

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

Según las tablas 12 y 13, se observa el descenso del oxígeno disuelto de 45 mg/L a 2.1 mg/L evidencia un alto consumo de oxígeno asociado a procesos bioquímicos del tratamiento, lo que puede generar condiciones limitantes para usos posteriores del efluente. Asimismo, la reducción de coliformes fecales es limitada (de 350×10^6 a 280×10^6 NMP/100 mL), manteniéndose concentraciones microbiológicas elevadas.

- Determinación de los parámetros de calidad de agua

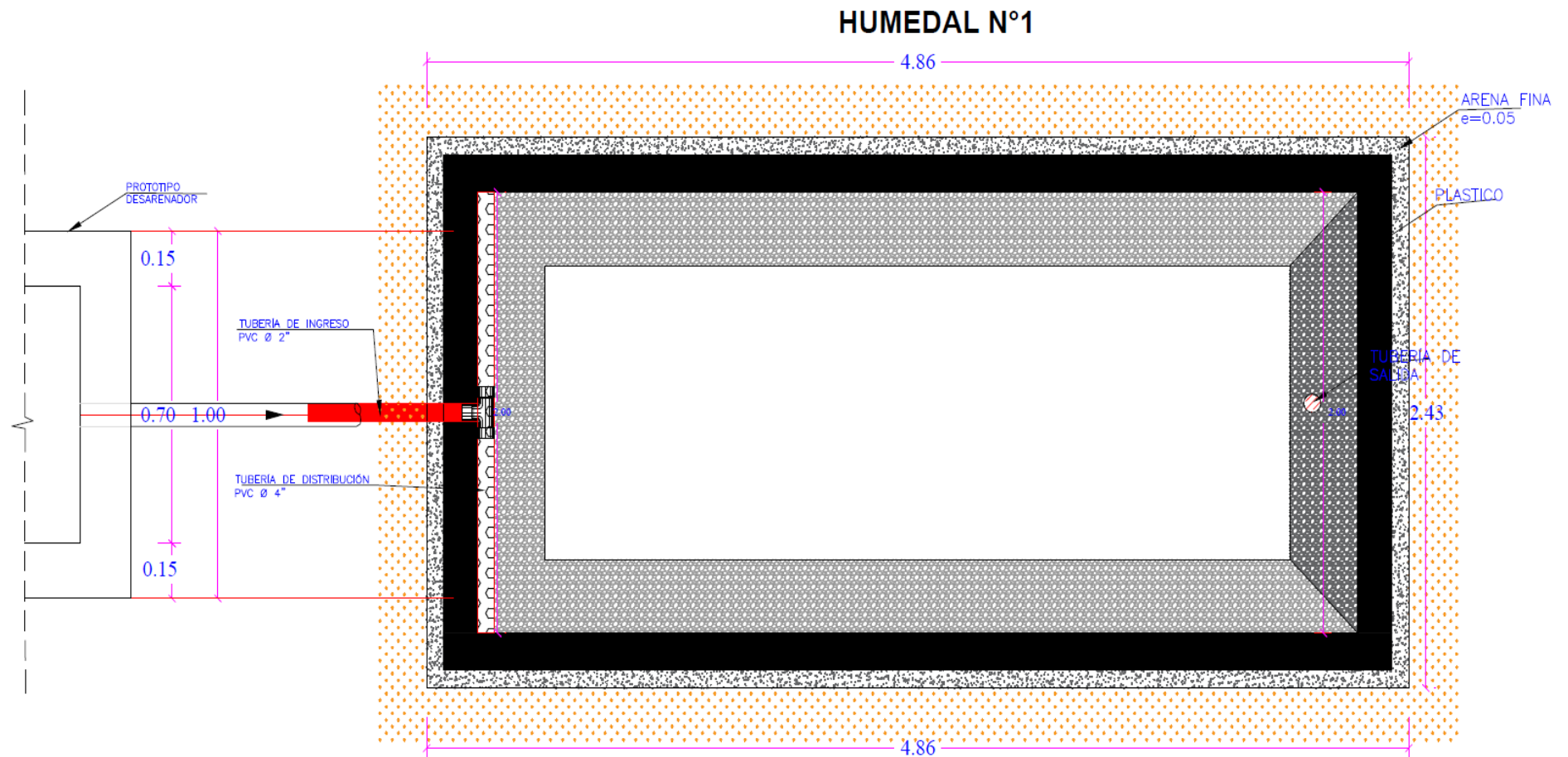
Las muestras de agua residual fueron recolectadas siguiendo los procedimientos establecidos para el muestreo de aguas residuales y posteriormente analizadas en un laboratorio acreditado

- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) fue determinada mediante el método de incubación durante cinco días a una temperatura de 20 °C, conforme a los procedimientos establecidos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- La Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue determinada mediante el método del dicromato en medio ácido con posterior lectura espectrofotométrica.
- Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) fueron determinados mediante el método gravimétrico, consistente en la filtración de la muestra a través de una membrana de fibra de vidrio previamente acondicionada, seguida del secado y pesada hasta obtener peso constante.

Los procedimientos analíticos se realizaron conforme a los métodos estandarizados para el análisis de aguas residuales, garantizando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Figura 21.

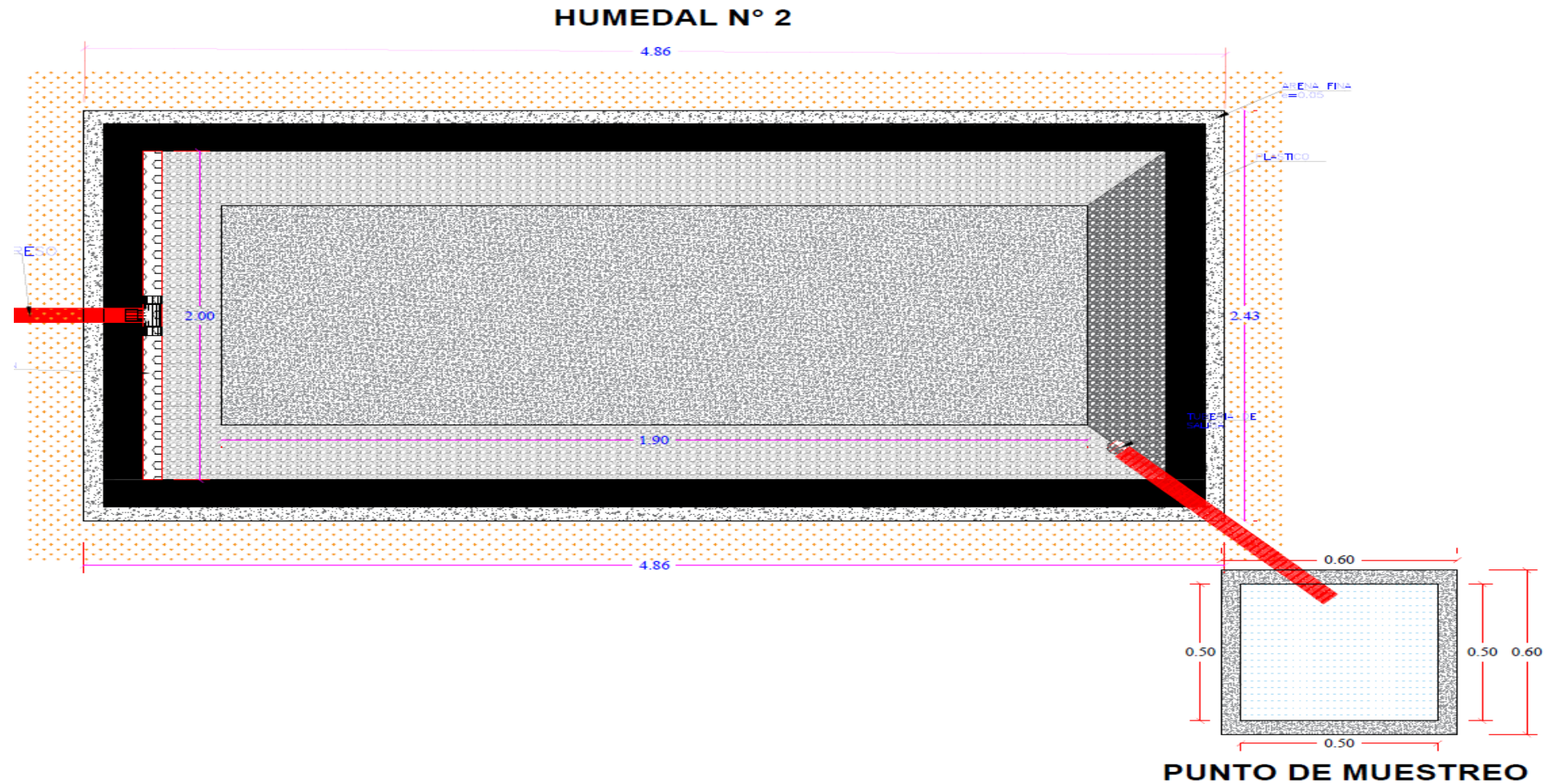
Vista en planta de la geometría del humedal N °1



Fuente. Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

Figura 22.

Vista en planta de la geometría del humedal N °2



Fuente. Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

CAPÍTULO III.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

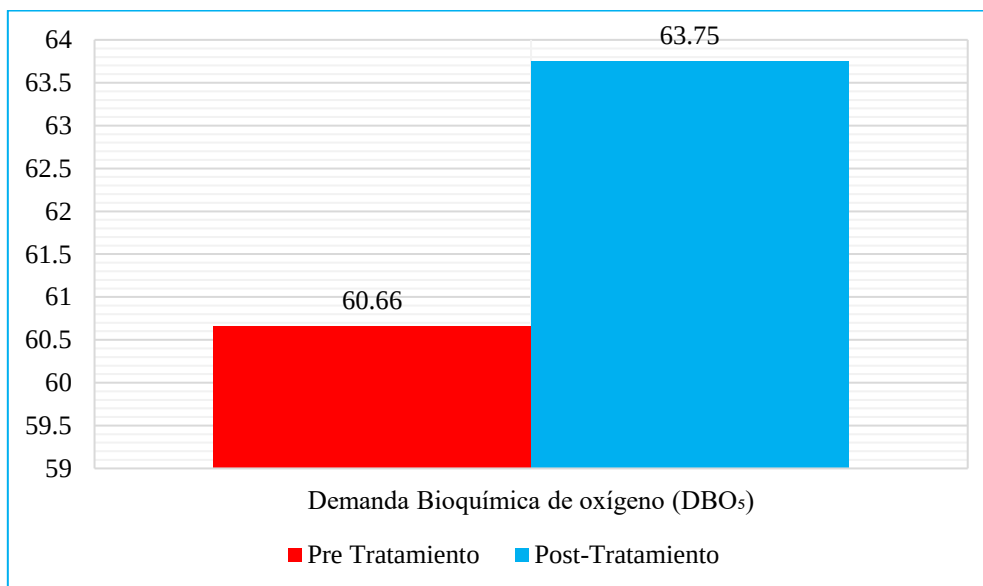
3.1.1. Evaluar la reducción de DBO, DQO y OD en las aguas residuales, aplicando humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*.

El objetivo fue cuantificar la eficiencia de humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la remoción de DBO₅ y DQO en aguas residuales del río Alameda, mediante análisis comparativos antes y después del tratamiento.

3.1.1.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Figura 23.

Resultados de la Demanda Bioquímica (DBO₅) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la figura 23 se observó la comparación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) antes y después del tratamiento. Se registra un valor de 60.66 mg/L en el pretratamiento y 63.75 mg/L en el postratamiento. Estos resultados indican que no se presenta una disminución de la DBO₅ entre ambos muestreos, sino un ligero incremento del valor medido después del tratamiento.

Este comportamiento puede estar relacionado con variaciones en la carga orgánica del agua residual, diferencias en las condiciones de muestreo, o con el hecho de que el humedal subsuperficial se encuentre en una etapa inicial de funcionamiento, en la cual los procesos biológicos aún no se encuentran completamente estabilizados.

Según Kadlec y Wallace (2009), los humedales construidos requieren un periodo de acondicionamiento para desarrollar condiciones óptimas de tratamiento, debido a que los procesos biológicos responsables de la remoción de materia orgánica no alcanzan inmediatamente su máxima eficiencia. Asimismo, Vymazal (2007) señala que la eficiencia de remoción en humedales puede presentar variaciones durante las primeras etapas de operación, influenciadas por cambios en la carga hidráulica, la materia orgánica y la dinámica microbiológica del sistema.

En general, la figura 23 evidencia que el humedal subsuperficial no logró una reducción significativa de la DBO₅ durante el periodo evaluado. Sin embargo, los valores registrados confirman la presencia de materia orgánica biodegradable, lo que justifica la aplicación del humedal como alternativa de tratamiento que, con un mayor tiempo de operación y posibles ajustes en el sistema, podría contribuir progresivamente a la mejora de la calidad del agua del río Alameda.

- **Remoción**

Aplicando la ecuación:

$$nDBO = \frac{60.66 - 63.75}{60.66} * 100$$
$$nDBO = -5.09 \%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de -5.09%.

La ausencia de remoción efectiva de DBO₅ sugiere que el sistema no alcanzó condiciones óptimas para la degradación biológica de la materia orgánica biodegradable durante el periodo de evaluación.

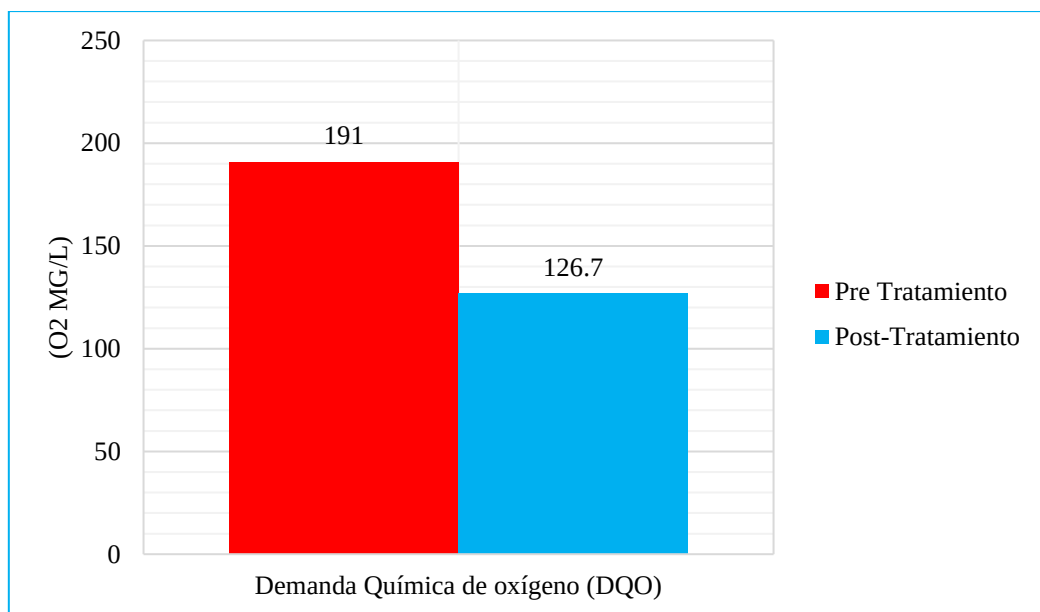
Este comportamiento puede explicarse por:

- Tiempo de retención hidráulica insuficiente.
- Condiciones predominantemente anóxicas en el lecho filtrante.
- Alta carga orgánica inicial.
- Periodo de maduración vegetal incompleto.
- Baja temperatura ambiental que reduce la actividad microbiana.

3.1.1.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Figura 24.

Resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la figura 24, se observa el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) antes y después del tratamiento mediante el humedal subsuperficial. En el pretratamiento, la DQO registró un valor de 191 mg/L, mientras que en el postratamiento disminuyó a 126.7 mg/L. Esta reducción evidencia que el humedal logró remover una parte de las sustancias oxidables presentes en el agua residual.

Este resultado indicó que el sistema es efectivo para reducir la carga contaminante total, que incluye tanto materia orgánica como compuestos inorgánicos. Si bien el valor obtenido en el postratamiento aún no corresponde a un agua de buena calidad, la disminución observada confirma que el humedal contribuye de manera positiva al mejoramiento del agua residual, y que su eficiencia podría incrementarse con un mayor tiempo de operación y la estabilización del sistema.

Asimismo, la comparación entre los valores de DQO y DBO₅ permitió interpretar el grado de biodegradabilidad del agua residual. En la etapa de pretratamiento, la relación DQO/DBO₅ fue mayor a 2.5, lo que indica una baja biodegradabilidad y la presencia de compuestos orgánicos de difícil degradación biológica. Luego del tratamiento, esta relación se mantuvo elevada, debido a que, si bien la DQO disminuyó, la DBO₅ no presentó reducción significativa.

- **Remoción**

Aplicando la ecuación:

$$nDQO = \frac{191 - 126.7}{191} * 100$$

$$nDQO = 33.67 \%$$

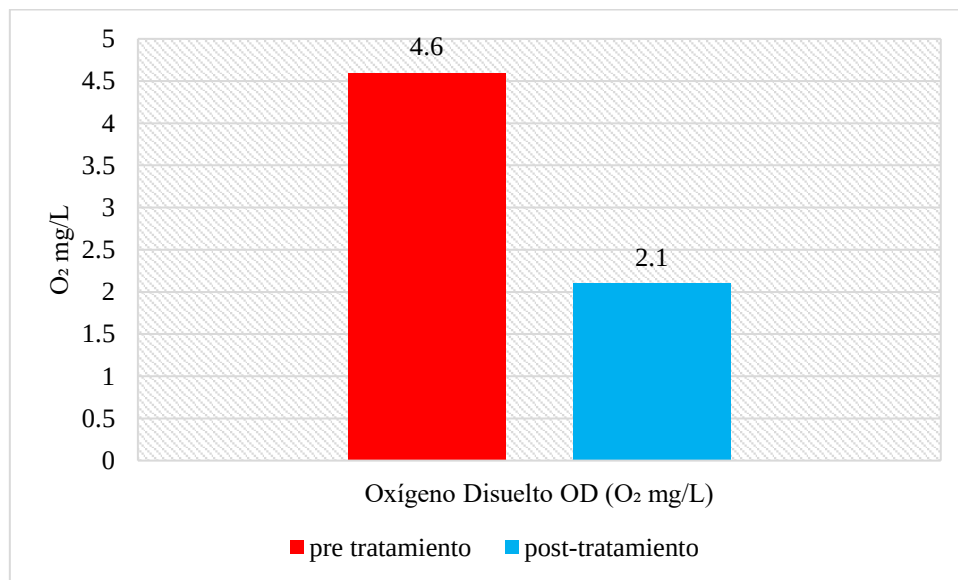
Se obtuvo una eficiencia de remoción de 33.67%.

La reducción observada indica una disminución moderada de la carga orgánica total presente en el agua residual. Este comportamiento atribuye principalmente a procesos combinados de sedimentación, filtración y degradación parcial de compuestos orgánicos. No obstante, la eficiencia obtenida se encuentra por debajo de los valores reportados en sistemas maduros de humedales artificiales, lo que sugiere limitaciones operativas como tiempo de retención hidráulica insuficiente o periodo de estabilización biológica incompleto.

3.1.1.3. Oxígeno Disuelto (OD)

Figura 25.

Resultados de Oxígeno Disuelto (OD) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la Figura 25 se observa la variación del oxígeno disuelto antes y después del tratamiento. El valor de OD en el pretratamiento fue de 4.6 O₂ mg/L, disminuyendo a 2.1 O₂ mg/L en el postratamiento, lo que representa una reducción de 2.5 O₂ mg/L.

Esta disminución es técnicamente esperada en sistemas de humedales subsuperficiales y confirma la ocurrencia de procesos biológicos activos dentro del sistema. Los microorganismos presentes en el sustrato consumen el oxígeno disponible durante la degradación aerobia de la materia orgánica, reduciendo progresivamente su concentración a lo largo del recorrido del agua en el humedal. Asimismo, las condiciones propias del flujo subsuperficial limitan la reoxigenación del agua desde la atmósfera, favoreciendo el establecimiento de zonas anóxicas que activan procesos complementarios de desnitrificación y degradación anaerobia.

La reducción del OD no representa un resultado negativo, sino una evidencia directa de la actividad biológica del humedal, siendo un indicador de que los procesos de tratamiento están ocurriendo dentro del sistema.

3.1.2. Determinar la eficiencia de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la disminución de sólidos suspendidos totales (SST)

El objetivo fue cuantificar la eficiencia de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), mediante la comparación de las concentraciones de entrada y salida del sistema durante el periodo de evaluación.

En los anexos (Fotografía 15), se evidenció la presencia de brotes nuevos con coloración rojiza y estructuras rizomáticas activas, indicando capacidad de rebrote y adaptación inicial al medio de crecimiento. Asimismo, se identificó la acumulación y retención de materiales sólidos entre las raíces y rizomas de la vegetación, observándose la presencia de residuos como fragmentos plásticos y otros materiales particulados. Este comportamiento evidencia la capacidad física del sistema radicular para actuar como una barrera natural de filtración, reteniendo sólidos suspendidos y materiales transportados por el flujo del agua.

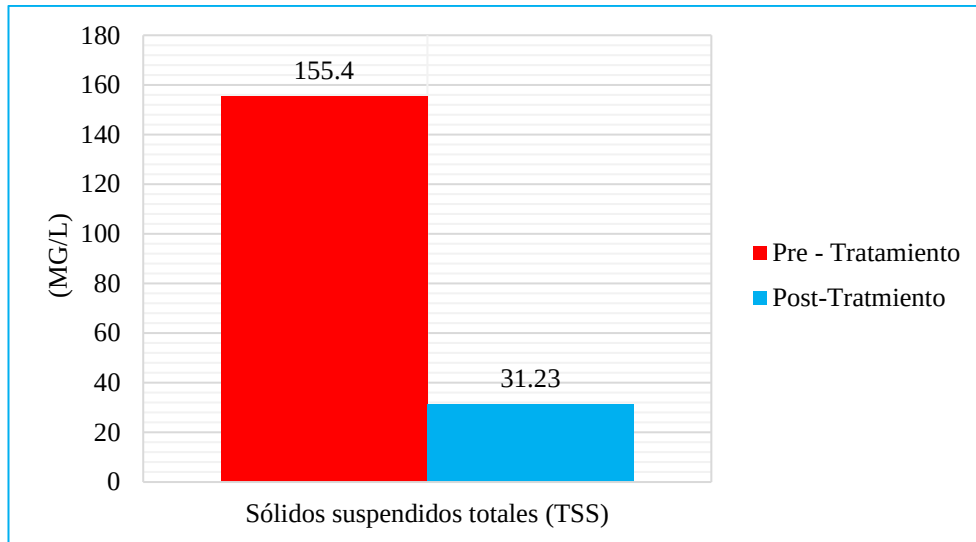
Los resultados permiten determinar la eficiencia real del sistema bajo condiciones ambientales locales y con cargas contaminantes representativas del río Alameda, teniendo en cuenta las variaciones observadas entre la primera campaña de muestreo y la segunda campaña. Esta comparación posibilitó evaluar el comportamiento del sistema frente a diferentes niveles de carga contaminante y ajustar la interpretación de la remoción lograda.

Según los análisis de laboratorio acreditado (Informe N.º 1913004-2025 y N.º 1914899-2025), las concentraciones de SST registradas en la entrada del humedal fueron:

- Primera campaña (30/09/2025): 155.40 mg/L
- Segunda campaña (13/11/2025): 31.23 mg/L

Figura 26.

Resultados de la Sólidos suspendidos totales (SST) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la figura 26 se observa una reducción muy significativa después del tratamiento de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el humedal. El valor inicial fue de 155.40 mg/L, mientras que el valor final disminuyó hasta 31.23 mg/L, lo que representa una remoción considerable de material sólido presente en el agua residual. Esta fuerte disminución demuestra que el humedal subsuperficial es altamente eficiente en la retención y filtración de sólidos, gracias al sustrato y al flujo lento del agua. La reducción de los SST también explica la disminución de la turbiedad observada en los resultados, contribuyendo a una mejora visible en la calidad del agua tratada.

- **Remoción**

Aplicando la ecuación:

$$n_{SST} = \frac{155.4 - 31.23}{155.4} * 100$$

$$n_{SST} = 79.90 \%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de 79.90 %.

Este resultado evidencia una remoción eficiente de sólidos suspendidos, atribuible principalmente al mecanismo de filtración física a través del medio granular del humedal. El elevado porcentaje confirma que el sistema funcionó adecuadamente como unidad de

retención de partículas, favorecido por la porosidad del sustrato y la presencia de raíces que incrementan la superficie de contacto.

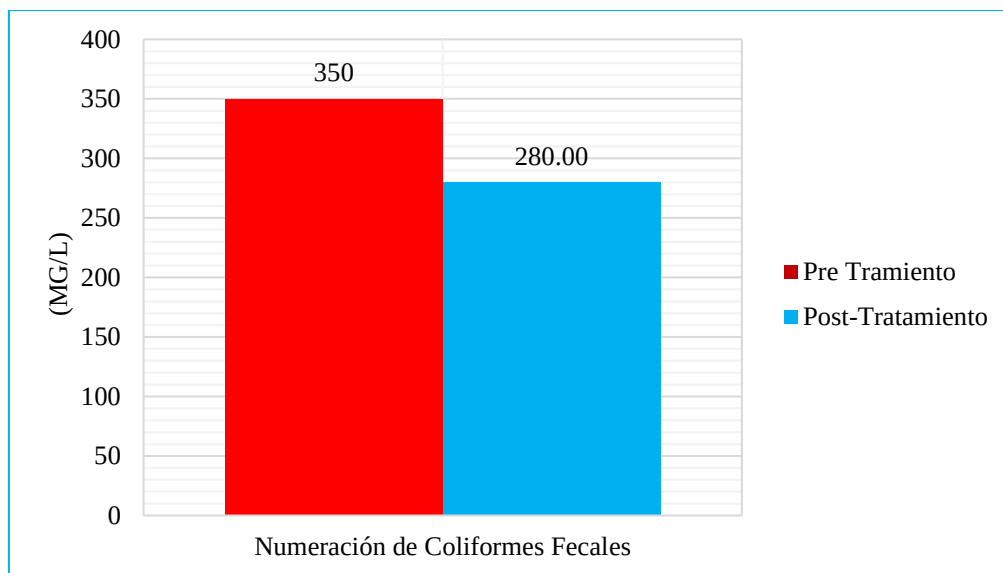
3.1.3. Evaluar el efecto del uso de humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la reducción de coliformes fecales

El análisis efectuado permitió evaluar la capacidad de los humedales artificiales plantados con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* para la reducción de coliformes fecales en las aguas residuales del punto de estudio. Los resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento evidencian una elevada carga microbiológica, característica de aguas residuales domésticas sin tratamiento previo.

Los valores registrados antes del tratamiento alcanzaron concentraciones de 350×10^6 NMP/100 mL en el primer muestreo y 280×10^6 NMP/100 mL en el segundo muestreo, de acuerdo con los análisis realizados por un laboratorio acreditado. Estos niveles reflejan una contaminación microbiológica significativa, representando un riesgo sanitario y ambiental para el cuerpo receptor, lo que justifica la implementación de sistemas de tratamiento como los humedales artificiales para la atenuación de microorganismos patógenos.

Figura 27.

Resultados de la Numeración de Coliformes Fecales en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

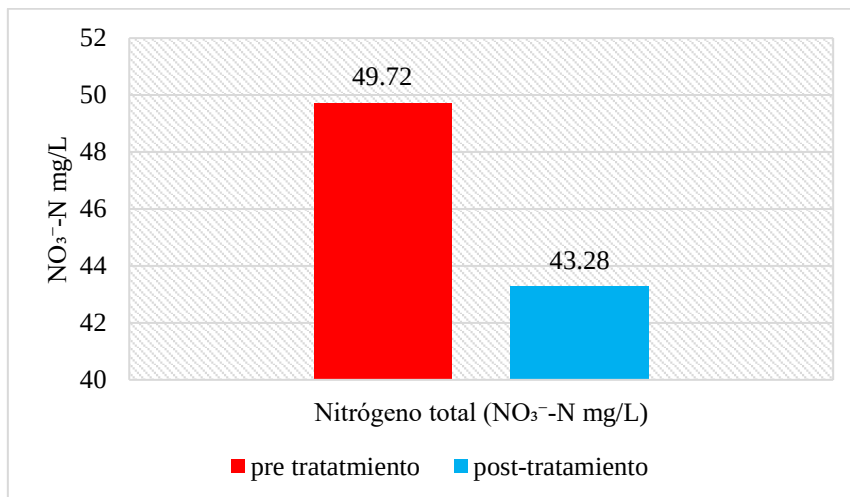
El análisis de la numeración de coliformes fecales evidencias que el tratamiento aplicado logró una reducción de la carga microbiológica, pasando de un valor inicial de 350 a 280 unidades en el período post-tratamiento. Esta disminución indica que el sistema de tratamiento tiene un efecto positivo en la remoción parcial de microorganismos

indicadores de contaminación fecal. No obstante, la reducción observada es moderada, lo que sugiere que el proceso no fue completamente eficiente en la eliminación de coliformes fecales.

3.1.3.1. Nitrógeno Total

Figura 28.

Resultados de la Numeración de Nitrógeno total en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la Figura 28 se observa una reducción del nitrógeno total, pasando de 49.72 NO₃⁻-N mg/L en el pretratamiento a 43.28 NO₃⁻-N mg/L en el postratamiento, evidenciando que el sistema contribuye a la reducción de este nutriente durante el tratamiento.

Esta remoción se atribuye a procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación que ocurren en las zonas aerobias y anóxicas del sustrato respectivamente, así como a la asimilación directa de nitrógeno por parte de las raíces de *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* para su metabolismo vegetal.

Remoción.

Aplicando la ecuación 1:

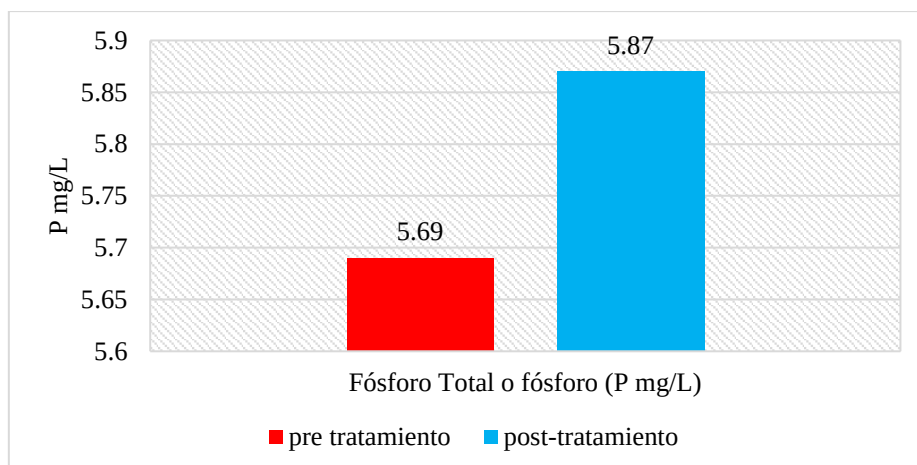
$$nNitrógeno = \frac{49.72 - 43.28}{49.72} * 100$$

$$nNitrógeno = 12.95\%$$

3.1.3.2. Fósforo Total.

Figura 29.

Resultados de Fósforo total en el pretratamiento y postratamiento.



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

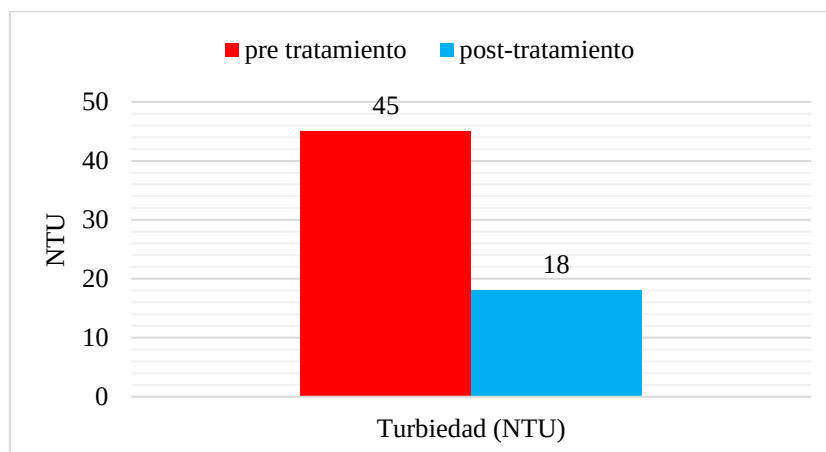
En la Figura 29 se observa un ligero incremento en la concentración de fósforo total, pasando de 5.69 P mg/L en el pretratamiento a 5.87 P mg/L en el postratamiento, lo que representa una variación de +0.18 mg/L (+3.16%).

Este comportamiento se explica por la liberación de fósforo desde el sustrato granular durante la etapa de arranque del humedal, proceso conocido como "desorción de fósforo", en el cual el medio filtrante nuevo libera fosfatos previamente adsorbidos o presentes en los materiales que lo componen. Adicionalmente, la descomposición de materia orgánica acumulada en el sustrato genera fósforo inorgánico soluble que se reincorpora al agua tratada.

3.1.3.3. Turbiedad

Figura 30.

Resultados de la turbiedad en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la Figura 30 se observa una disminución significativa de la turbiedad después del tratamiento, pasando de 45 NTU en el pretratamiento a 18 NTU en el postratamiento. Esta reducción es coherente con la disminución de SST registrada, dado que la turbiedad está directamente relacionada con la concentración de partículas en suspensión en el agua.

La remoción de turbiedad se atribuye a los procesos físicos de sedimentación y filtración que ocurren en el sustrato del humedal, así como a la retención de sólidos por el sistema radicular de la vegetación. La mejora observada refleja una ganancia en la calidad visual y física del agua tratada.

- **Remoción**

Aplicando la ecuación 1:

$$nturbiedad = \frac{45 - 18}{45} * 100$$

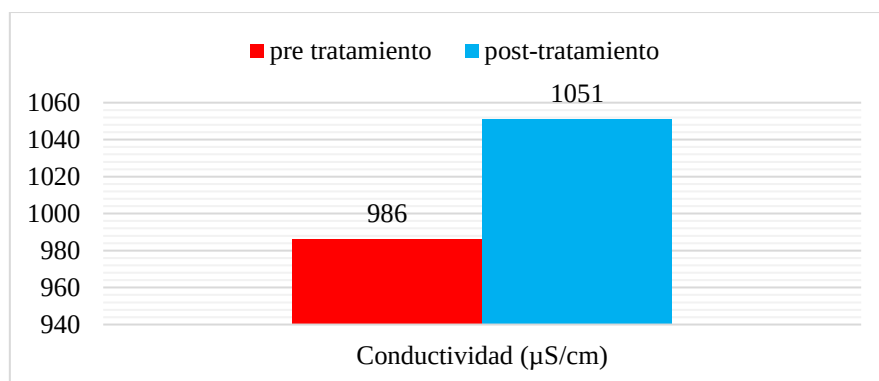
$$nturbiedad = 60.0\%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de turbiedad de 60.0%, lo que evidencia la capacidad del humedal artificial para clarificar el agua residual mediante los procesos de filtración y sedimentación que ocurren en el sustrato granular. Este resultado confirma una mejora significativa en la calidad física del agua tratada, reduciendo de 45 NTU a 18 NTU, valor que representa una disminución considerable de la opacidad del efluente.

3.1.3.4. Conductividad eléctrica.

Figura 31.

Resultados de conductividad eléctrica en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

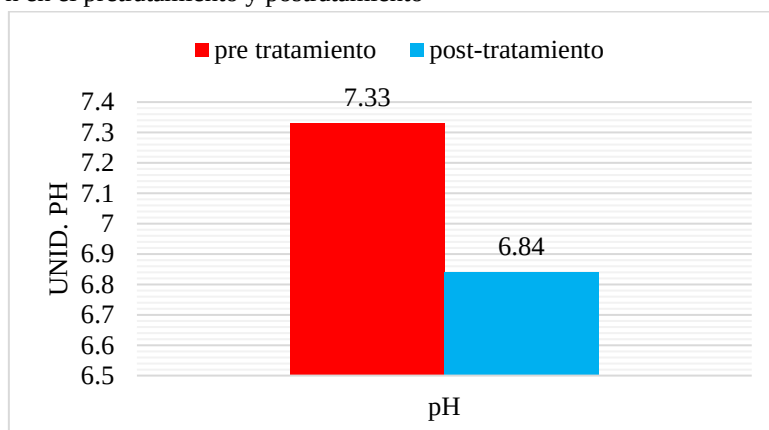
En la Figura 31 se observa un incremento en la conductividad eléctrica, pasando de 986 µS/cm en el pretratamiento a 1051 µS/cm en el postratamiento, lo que representa un aumento de 65 µS/cm (+6.6%).

Este comportamiento es técnicamente esperado en sistemas de humedales artificiales y no indica deterioro de la calidad del agua. El incremento se explica por la liberación de iones minerales provenientes del sustrato granular durante su proceso de estabilización inicial, la mineralización de compuestos orgánicos por acción microbiana que genera iones inorgánicos solubles, y la evapotranspiración de la vegetación que concentra los solutos disueltos al reducir el volumen de agua. Estos procesos son característicos de la etapa de arranque del humedal y tienden a estabilizarse conforme el sistema madura.

3.1.3.5. PH

Figura 32.

Resultados del Ph en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 12 y 13.

En la Figura 32 se observa una ligera variación del pH, pasando de 7.33 en el pretratamiento a 6.84 en el postratamiento. Ambos valores se encuentran dentro del rango neutro (6.5 – 8.5), por lo que el agua tratada cumple con los estándares de calidad establecidos por el D.S. N° 003-2010-MINAM para este parámetro.

La leve disminución del pH puede atribuirse a la producción de CO₂ durante los procesos de degradación aerobia de materia orgánica por parte de los microorganismos del sustrato, lo cual genera ácido carbónico que reduce ligeramente la alcalinidad del agua. Este comportamiento es normal en sistemas biológicos de tratamiento y no representa un riesgo para la calidad del efluente.

3.2. Discusiones

3.2.1. Discusión de resultados basada en la literatura científica

El incremento de la DBO₅ observado en el presente estudio, de 60.66 mg/L antes del tratamiento a 63.75 mg/L después del tratamiento, podría estar relacionado con la temporada de lluvias registrada durante el segundo muestreo. Durante dicha evaluación se evidenció un incremento considerable del caudal del río Alameda, condición que

probablemente redujo el tiempo de retención hidráulica dentro del humedal artificial, disminuyendo el tiempo de contacto entre el agua, el sustrato y los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica.

En ese sentido, la United States Environmental Protection Agency (EPA, 2000, p. 25) señala que los altos caudales producidos por lluvias intensas reducen el tiempo de residencia del agua y disminuyen la eficiencia de tratamiento en los humedales construidos. Asimismo, el incremento del flujo hidráulico pudo generar mayor arrastre de sedimentos y materia orgánica por escorrentía superficial, contribuyendo al ligero aumento de la DBO₅ registrado en los resultados obtenidos.

En cuanto a la DBO₅, los resultados evidenciaron que el sistema no logró reducir la materia orgánica biodegradable a niveles aceptables según la normativa vigente. Este comportamiento difiere de lo reportado por Pérez Salazar et al. (2019), quienes alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 90%, con concentraciones finales menores a 13 mg/L.

De manera similar, Bedoya et al. (2017) reportaron eficiencias cercanas al 80%, dentro de los rangos esperados para este tipo de sistemas. La menor eficiencia observada en la presente investigación puede atribuirse a la ausencia de un pretratamiento adecuado, un tiempo de operación insuficiente o condiciones limitantes para el desarrollo de biomasa microbiana, siendo la DBO₅ el parámetro más crítico del sistema. Respecto a la DQO, se observó una reducción parcial de la carga contaminante, lo cual coincide con lo reportado en estudios previos.

Pérez Salazar et al. (2019) registraron eficiencias de remoción cercanas al 72%, mientras que Bedoya et al. (2017) reportaron valores dentro de rangos aceptables para descarga. En la presente investigación, si bien se evidenció una disminución de la DQO, esta no fue suficiente para reflejar una degradación completa de la materia orgánica. La diferencia entre los valores de DQO y DBO₅ sugiere la presencia de compuestos de baja biodegradabilidad, lo cual limita la eficiencia del tratamiento biológico (Kadlec & Wallace, 2009). En conjunto, el análisis de estos parámetros evidenció que el humedal artificial presentó un comportamiento típico de sistemas en etapa inicial o con limitaciones operativas.

Mientras que la DQO mostró una reducción moderada, la DBO₅ y el oxígeno disuelto evidenciaron deficiencias importantes, lo que indica que el sistema no alcanzó condiciones óptimas de tratamiento. Este comportamiento es consistente con lo señalado

en la literatura, donde se establece que la eficiencia de los humedales depende del tiempo de maduración, el pretratamiento y las condiciones hidráulicas del sistema (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2007).

Los resultados obtenidos durante la evaluación del humedal artificial estuvieron influenciados por las condiciones climáticas predominantes durante el periodo de estudio. En la época de lluvias se registró un incremento del caudal afluente debido al aporte de escorrentías superficiales, efecto first flush, lo que ocasionó una mayor dilución del agua residual y el ingreso de sedimentos, materia orgánica y otros contaminantes al sistema de tratamiento.

El aumento del caudal redujo el tiempo efectivo de retención hidráulica del humedal, afectando la eficiencia de remoción de algunos parámetros, especialmente la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), debido a que el contacto entre el agua residual, el medio filtrante y los microorganismos fue menor. Por el contrario, durante la época seca o de estiaje se presentan condiciones hidráulicas más estables, permitiendo un mayor tiempo de permanencia del agua dentro del humedal y favoreciendo los procesos de sedimentación, filtración y degradación biológica.

3.2.2. Discusión de resultados según el D.S. N.º 003-2010-MINAM

De acuerdo con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. N.º 003-2010-MINAM, (El Peruano et al., 2010), para efluentes de aguas residuales domésticas, los valores de DBO₅ obtenidos en el postratamiento no superan el límite permitido de 100 mg/L, lo que indica que el efluente tratado no cumple con los estándares requeridos para su descarga a un cuerpo receptor.

Este resultado evidencia que el humedal subsuperficial, durante el periodo de evaluación, no logró una remoción efectiva de la materia orgánica biodegradable. En el caso de la DQO, los valores obtenidos en el postratamiento se encuentran por debajo del límite máximo permisible de 250 mg/L, lo que demuestra una reducción parcial de la carga contaminante total del agua residual. Este comportamiento indica que el sistema de tratamiento presenta mayor eficiencia en la remoción de compuestos orgánicos totales que en la degradación biológica específica, lo cual es común en humedales que se encuentran en una etapa inicial de operación.

Respecto a los sólidos suspendidos totales, los resultados post-tratamiento se encuentran dentro del rango permitido por la normativa, evidenciando que el humedal subsuperficial

cumple adecuadamente con la función de retención y filtración de partículas sólidas, lo que contribuye a mejorar la calidad del efluente tratado.

3.2.3. Discusión del oxígeno disuelto

En relación con el oxígeno disuelto (OD), se observó una disminución significativa desde 4.6 mg/L hasta 2.1 mg/L en el efluente.

Según Vymazal, este comportamiento es característico de los humedales de flujo subsuperficial, donde la transferencia de oxígeno es limitada debido a la ausencia de contacto directo con la atmósfera, generando condiciones predominantemente anóxicas, quien indica que estos sistemas presentan limitaciones en la transferencia de oxígeno debido a la ausencia de contacto directo con la atmósfera.

Al evaluar la dinámica del oxígeno dentro del sistema combinado de humedales artificiales, se determinó que el descenso drástico del Oxígeno Disuelto (OD) coincide con las altas tasas de acumulación de lodos orgánicos en el lecho de las celdas de tratamiento. Este fenómeno se encuentra directamente ligado a los mecanismos de retención y sedimentación de la carga particulada que ingresa desde el afluente del río Alameda. Como explican Metcalf y Eddy (2014, p. 35), los sólidos residuales que se descargan con las aguas residuales tratadas tienden a depositarse con el tiempo en el fondo de los cuerpos de agua; dado que estas partículas son parcialmente orgánicas, poseen la capacidad de descomponerse tanto por vías anaeróbicas como aeróbicas, dependiendo de las condiciones del medio.

En este proceso, la biomasa algal que se sedimenta en el fondo también experimenta una degradación, aunque de manera mucho más lenta. Por consiguiente, el oxígeno consumido durante la descomposición aeróbica de toda esta materia acumulada en el sedimento representa una demanda adicional severa sobre el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua. Esta Demanda de Oxígeno de los Sedimentos (SOD) llega a superar la capacidad de reaeración natural del humedal, lo que valida físicamente la correlación inversa observada entre el agotamiento del OD y la alta velocidad de estabilización biológica del sustrato.

Diversos estudios han demostrado que en humedales artificiales el oxígeno disuelto tiende a disminuir a lo largo del sistema debido al consumo biológico y a la limitada transferencia de oxígeno desde la atmósfera. Puigagut et al. (2010) evidencian que el consumo de oxígeno en estos sistemas es rápido, mientras que Liu et al. (2016) reportan problemas de suministro insuficiente de oxígeno en humedales construidos. Asimismo,

investigaciones experimentales han confirmado que el OD disminuye a lo largo del flujo dentro del humedal (Zhang et al., 2012), lo cual es consistente con la dinámica de remoción de materia orgánica. Por tanto, la reducción del oxígeno disuelto en el efluente no constituye una falla del sistema, sino un comportamiento inherente a los procesos biológicos que ocurren en estos sistemas de tratamiento.

La reducción del OD confirma la ocurrencia de procesos biológicos activos, particularmente la degradación aerobia de materia orgánica. Sin embargo, valores cercanos a 2 mg/L pueden representar una limitación ambiental si el efluente es descargado a cuerpos naturales, ya que podrían afectar la vida acuática.

Según el ECA (D.S. N.º 004-2017-MINAM), (El Peruano, 2009), los valores de OD para protección de vida acuática deben ser mayores a 5 mg/L, por lo que el efluente no cumpliría con este criterio ambiental.

3.2.4. Discusión según límites referenciales de calidad de efluentes en Perú

Al comparar los resultados obtenidos con los límites referenciales comúnmente utilizados en Perú, se observa que los valores de DBO₅ posteriores al tratamiento continúan siendo superiores al valor recomendado menor a 100 mg/L, lo que confirma una baja eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable.

Este comportamiento puede atribuirse a la baja biodegradabilidad del agua residual, evidenciada por la relación DQO/DBO₅ mayor a 2.5. En cuanto al fósforo total, los valores registrados superan ampliamente el valor referencial de 2 mg/L, lo que indica la presencia de nutrientes en exceso en el efluente tratado.

Este resultado sugiere que el humedal no logró una remoción eficiente de fósforo durante el periodo de estudio, posiblemente debido a la saturación del medio filtrante o a la limitada capacidad de absorción de las especies vegetales utilizadas. Asimismo, los valores de coliformes fecales superan los límites referenciales establecidos, lo que evidencia que el tratamiento mediante humedal subsuperficial no fue suficiente para garantizar una reducción significativa de microorganismos patógenos. Esto confirma la necesidad de incorporar etapas adicionales de desinfección si se considera un posible reuso del agua tratada.

3.2.5. Discusión según la Norma Técnica OS.090 – DIGESA

De acuerdo con la Norma Técnica OS.090 de DIGESA, los parámetros analizados en el presente estudio (DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nutrientes y coliformes fecales)

corresponden a los indicadores mínimos requeridos para la evaluación de la calidad de aguas residuales.

En ese sentido, los análisis realizados cumplen con los criterios técnicos de evaluación establecidos por dicha normativa. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que, si bien el humedal subsuperficial presenta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos y una reducción parcial de la DQO, no se alcanzan niveles adecuados de remoción para la DBO₅, fósforo total y coliformes fecales. Esto evidencia que el sistema requiere mejoras operativas o un mayor tiempo de funcionamiento para cumplir con los estándares de calidad ambiental exigidos.

Este comportamiento es consistente con sistemas en fase de arranque, como lo indican Vymazal (2011) y Kadlec & Wallace (2009), quienes señalan que los humedales requieren periodos de maduración para alcanzar su máximo rendimiento. Lo cual no cumple completamente con el ECA para reúso o protección ambiental

En consecuencia, la aplicación de la Norma Técnica OS.090 permitió una evaluación integral del desempeño del humedal, confirmando que los parámetros seleccionados son adecuados para determinar la eficiencia del sistema y evidenciando la necesidad de optimizar el proceso de tratamiento para alcanzar el cumplimiento normativo.

3.2.6. Discusión según el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua – D.S. N.º 004-2017-MINAM

En primer lugar, la DBO₅ constituye uno de los indicadores más relevantes de contaminación orgánica biodegradable. El valor obtenido en el postratamiento (63.75 mg/L) supera ampliamente los niveles aceptables establecidos en el ECA para la protección de cuerpos de agua y usos como riego. Este resultado evidencia que el sistema no logró reducir de manera efectiva la materia orgánica biodegradable, lo cual representa una limitación crítica, ya que su descarga podría generar un consumo significativo de oxígeno en el medio receptor, afectando directamente la vida acuática. En este sentido, la DBO₅ se posiciona como el principal parámetro limitante del sistema.

En relación con la DQO, el valor final registrado (126.7 mg/L) muestra una reducción importante respecto al influente, lo que indica que el humedal sí contribuye a disminuir la carga orgánica total. Sin embargo, aunque este valor podría ser aceptable en ciertos contextos normativos, desde el enfoque del ECA aún representa una carga contaminante considerable. La diferencia observada entre DQO y DBO₅ sugiere la presencia de

compuestos de baja biodegradabilidad, lo que limita la eficiencia global del tratamiento biológico.

Por otro lado, los sólidos suspendidos totales (SST) presentan el mejor desempeño del sistema, con una remoción de 79.90%. Este resultado refleja una alta eficiencia en los procesos físicos de filtración y sedimentación dentro del humedal. Desde la perspectiva del ECA, esta mejora contribuye positivamente a la calidad del agua, ya que la reducción de sólidos está asociada a menores niveles de turbiedad y transporte de contaminantes. En este caso, el sistema cumple adecuadamente su función como unidad de tratamiento físico.

En cuanto al oxígeno disuelto (OD), el valor obtenido en el efluente (2.1 mg/L) se encuentra por debajo de los niveles mínimos establecidos en el ECA (generalmente ≥ 5 mg/L para la conservación de ecosistemas acuáticos). Este resultado representa una limitación importante, ya que indica que el agua tratada no posee condiciones adecuadas para sostener vida acuática. La disminución del OD está asociada al consumo de oxígeno por parte de los microorganismos durante la degradación de la materia orgánica, lo cual es característico de los humedales subsuperficiales; sin embargo, desde el punto de vista ambiental, constituye un incumplimiento relevante.

En conjunto, el análisis de estos parámetros prioritarios evidencia que el humedal artificial presenta un desempeño parcialmente eficiente. Mientras que logra resultados satisfactorios en la remoción de SST, presenta deficiencias importantes en la reducción de DBO₅ y en la recuperación del oxígeno disuelto, que son determinantes para el cumplimiento del ECA. La DQO, por su parte, muestra una mejora intermedia, indicando que el sistema sí reduce la carga contaminante, pero no en niveles suficientes para garantizar la calidad ambiental del efluente.

CAPITULO IV.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El análisis conjunto de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), en concordancia con los fundamentos del tratamiento de aguas residuales mediante humedales subsuperficiales descritos en el marco teórico, permitió evaluar el comportamiento de la carga orgánica antes y después del tratamiento. De acuerdo con la metodología empleada, que incluyó la medición de estos parámetros en el afluente y efluente del sistema, los resultados obtenidos evidenciaron que la DBO₅ no presentó una reducción significativa, observándose incluso un ligero incremento en su valor.

- El análisis conjunto de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) permitió evaluar el comportamiento de la carga orgánica del agua residual antes y después del tratamiento en el humedal subsuperficial. Los resultados muestran que la DBO₅ no presentó una reducción después del tratamiento, ya que se observó un ligero incremento en su valor. Esto indicó que el humedal aún no alcanza una eficiencia adecuada para la remoción de la materia orgánica biodegradable, posiblemente debido al corto tiempo de operación o a la falta de estabilización biológica del sistema. Por otro lado, la DQO sí mostró una disminución importante luego del tratamiento, lo que evidencia que el humedal contribuye a la reducción de la carga contaminante total del agua residual. Esta diferencia de comportamiento entre ambos parámetros sugiere que el sistema está logrando remover principalmente compuestos no biodegradables o parcialmente biodegradables, mientras que la remoción de materia orgánica fácilmente biodegradable requiere un mayor tiempo de funcionamiento. En conjunto, los resultados confirman que el humedal subsuperficial tiene un efecto positivo en la mejora de la calidad del agua, pero necesita un periodo de adaptación para alcanzar una mayor eficiencia en la reducción de la DBO₅.
- La comparación de los sólidos suspendidos totales evidenció una reducción muy significativa después del tratamiento, pasando de 986 mg/L en el pretratamiento a 31.23 mg/L en el postratamiento. Este resultado demostró que el humedal subsuperficial es altamente eficiente en la remoción de sólidos, gracias a los procesos de filtración y sedimentación que ocurren en el sustrato.

La notable disminución de los TSS confirmó que el sistema cumple adecuadamente su función para mejorar la claridad del agua y reducir la turbiedad, siendo uno de los parámetros con mejor desempeño en el tratamiento.

- La evaluación de la calidad del agua del río Alameda mediante la aplicación de humedales artificiales permitió evidenciar una mejora en los parámetros microbiológicos analizados, particularmente en la reducción de coliformes fecales, lo que demuestra la capacidad del sistema para disminuir parcialmente la carga contaminante. No obstante, la eficiencia alcanzada no fue suficiente para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad de agua establecidos por la normativa ambiental vigente, lo que indica que el tratamiento aplicado presenta limitaciones operativas y de diseño. En consecuencia, se concluye que los humedales artificiales constituyen una alternativa viable y ambientalmente sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas en el distrito de Jesús Nazareno; sin embargo, resulta necesario optimizar su configuración y complementar el sistema con procesos adicionales de desinfección, a fin de asegurar una remoción más eficiente de microorganismos patógenos y reducir los riesgos sanitarios y ambientales asociados a la descarga o reutilización del agua tratada.
- La disminución del oxígeno disuelto evidenció el desarrollo de procesos biológicos activos dentro del humedal artificial, asociados principalmente al consumo de oxígeno durante la degradación aerobia de la materia orgánica. Este comportamiento corresponde a la dinámica típica de los humedales de flujo subsuperficial, donde las condiciones de transferencia limitada de oxígeno favorecen el desarrollo de procesos microbiológicos de tratamiento. Sin embargo, considerando que el valor registrado en el efluente fue de 2,1 mg/L, este no cumpliría con los criterios establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental para Agua, aprobados mediante el D.S. N.º 004-2017-MINAM, que establecen concentraciones superiores a 5 mg/L para la protección de la vida acuática. No obstante, la presencia de concentraciones cercanas a 2 mg/L en el efluente sugiere la necesidad de considerar estrategias complementarias de aireación o procesos adicionales de acondicionamiento en caso de preverse la descarga directa a cuerpos receptores, con el fin de evitar posibles afectaciones sobre las condiciones ecológicas del medio acuático.

- En consecuencia, desde el enfoque del ECA, el agua tratada no cumple con los criterios necesarios para su descarga directa en cuerpos naturales, siendo necesario optimizar el sistema o incorporar tratamientos complementarios que permitan mejorar principalmente la remoción de materia orgánica biodegradable y la oxigenación del efluente.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar con el monitoreo integral de los parámetros de calidad de agua antes y después del humedal, con el objetivo de evaluar el desempeño global del sistema. Además, se sugiere considerar la ampliación del periodo de evaluación para obtener resultados más representativos y confiables que respalden la aplicación de humedales artificiales como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio.
- Se recomienda mantener el funcionamiento continuo del humedal subsuperficial por un mayor periodo de tiempo, con el fin de permitir la adaptación y el desarrollo adecuado de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica biodegradable. Asimismo, se sugiere realizar monitoreos periódicos de la DBO₅ para evaluar la evolución de la eficiencia del sistema y verificar si los valores disminuyen conforme el humedal alcanza su etapa de maduración.
- Dado que los resultados muestran una reducción significativa de la DQO, se recomienda conservar las condiciones actuales de operación del humedal, tales como el caudal de diseño y el tiempo de retención hidráulica. Además, se sugiere complementar el tratamiento con un control periódico de este parámetro para asegurar que la eficiencia de remoción se mantenga estable en el tiempo.
- Se recomienda optimizar el diseño y la operación de los humedales artificiales implementados en el río Alameda, incrementando el tiempo de retención hidráulica y mejorando la selección y densidad de las especies vegetales, con el fin de aumentar la eficiencia en la remoción de coliformes fecales. Asimismo, se sugiere complementar el sistema con una etapa adicional de desinfección, como cloración controlada, radiación ultravioleta u ozonización, que permita garantizar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental para agua y reducir los riesgos sanitarios y ambientales.

Finalmente, se recomienda realizar un monitoreo periódico de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, a fin de evaluar el desempeño del sistema a largo plazo y asegurar su sostenibilidad en el distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho.

Referencias bibliográficas

- Amabilis Sosa, L. E., Siebe Christina, Moeller Chávez, G., & Duran Dominguez de Bazua, M. del C. (2016). *REMOCIÓN DE MERCURIO POR Phragmites australis EMPLEADA COMO BARRERA BIOLÓGICA EN HUMEDALES ARTIFICIALES INOCULADOS CON CEPAS TOLERANTES A METALES PESADOS*.
- ARIAS I., C. A. (2005). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*.
<https://revistas.umng.edu.co/index.php/rcin/article/view/1321/1051>
- Baca Neglia, M. F. (2012). *TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL RIEGO DE ÁREAS VERDES EN EL DISTRITO DE SAN JUAN DE MARCONA*.
<https://repositorio.unac.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/0f490a1e-050a-4217-a7d4-fe1a2d7606a1/content>
- Camilo Iván, G. C. (2021). *Diseño de Humedales Artificiales*.
<https://apiescuelaing.bibliolabtech.com/server/api/core/bitstreams/4911a9a2-2a4f-44e6-90d3-89d3c0a7b49d/content>
- Carbo Gomez, A., & Vidal Marco, O. (1978). *MARQUEO DE PLANTACIONES*.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1978_21.pdf
- Cárdenas Llanccce, A. (2019). *Evaluación de la calidad de agua del río Savia, para uso potable del distrito de Canayre – Huanta – Ayacucho, 2016*.
<https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a5e93d63-4d7f-4541-9cc7-ba047d80b7ed/content>
- Castillo Nava, D. (2024). *DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO ECOLÓGICO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY DEBIDO A METALES PESADOS (Pb Y Cd) Y EMPLEO DE ESTRATEGIAS DE BIORREMEDIACIÓN PARA SU MITIGACIÓN A TRAVÉS DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL*.
<http://eprints.uanl.mx/27884/1/1080312981.pdf>
- Centeno Soto, C., & Quispe Crispin, M. L. (2021). *COLIFORMES TOTALES Y TERMOTOLERANTES EN LAS AGUAS TERMALES DE LAS PISCINAS DEL BARRIO DE SAN CRISTOBAL - HUANCAMELICA*.
<https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/622779aa-47ed-455f-b873-fcd649b9eff4/content>

- Delgadillo Lopez, A. E., Gonzalez Ramirez, C. A., & Prieto García, F. (2011). *FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- DIGESA. (s. f.). *NORMA OS.090 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Recuperado 25 de mayo de 2026, de <https://share.google/NTvZXXZMdT2RzfubP>
- El Peruano. (2009). *Estándar de Calidad Ambiental (ECA)*. Alberta Environment. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/011-2017-minam_0.pdf
- El Peruano, Pérez, A. G., Velasquez Quesquén, J., & Supremo, D. (2010). *NORMAS LEGALES AMBIENTE Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales*.
- FABIÁN, H. P. (2020). *CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y RESISTIVIDAD HIDRÁULICA*.
- Fernández Viveros, J., Murillo Cuevas, F. D., & Adame García, J. (2024). *Evaluación vegetativa para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales «vinaza» por medio de humedales contruidos* (Vol. 9, Número 2).
- Guardia Curasma, L. H., & Ccente Inga, R. C. (2023). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO, DQO Y SST DEL TANQUE IMHOFF, DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL DISTRITO DE ACORIA, PROVINCIA DE HUANCATELICA, DEPARTAMENTO DE HUANCATELICA*. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/64eb2678-86cd-4c00-b185-d108f53f12df/content>
- Huamani Gutierrez, C. V. (2022). *Implementación de plantas macrófitas (eichornia crassipes y salvinia natans) para el tratamiento de aguas residuales municipales de la ciudad de Ayacucho, 2022*. <https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/4e5fdb54-b4d4-422a-ab99-9e49668317c6/content>

- Inga Armas, N. E., Paitan Zavala, N. M., & Laurente Segovia, J. J. (2024). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales mejorados con rizobacterias del vertimiento N.º 8-Parra del Riego-El Tambo-Huancayo*. <https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/0237679d-fc4e-4ced-964c-8ac9c0871727/content>
- Kadlec, R. H. ., & Wallace, S. D. . (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Lima Coasaca, R. (2021). *EFFECTO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (TRH) SOBRE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES (FLUJO SUBSUPERFICIAL + FLUJO SUPERFICIAL) PLANTADOS CON Scirpus americanus, Elecharis montevidensis E Hydrocotyle bonariensis PARA TRATAMIENTO DE EFLUENTES BRUTOS*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e2a29948-33ad-4ff8-83c2-bb0549637af4/content>
- Londoño Cardona, L. A., & Vanegas Carolina, M. (2009). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL ALIMENTADOS CON AGUA RESIDUAL SINTÉTICA*. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/b1db3d1f-8722-4586-b894-7e9fc405dd27/content>
- Marín Acosta, C., & Solís Silvan, R. (2016). *Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México*. <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/54/253>
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. https://www.abpsoil.com/images/Books/Wastewater_Engineering_Treatment_Resource_Recovery_Metcalf_Eddy_5th.pdf
- Montes Iturrizaga, D., Aponte, H., & Valle Rubio, S. (2023). A new artificial wetland in the central coast of Perú: First characterization of its avifauna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(183), 352-370. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1883>
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). HUMEDALES CONSTRUIDOS CON PLANTAS ORNAMENTALES PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIA

ORGÁNICA Y NUTRIENTES CONTENIDOS EN AGUAS SERVIDAS. En 33 *Theoria* (Vol. 22, Número 1).

Moreno Mogollon, J. R., & Rangel Plata, J. T. (2018). *Evaluación de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal prototipo para el tratamiento de aguas residuales en una vivienda rural en el municipio de floridablanca*. <https://repository.upb.edu.co/server/api/core/bitstreams/d8c8002d-76d7-4078-bf97-2ee96f15b4ac/content>

Nava Rojas, J., & Lango Reynoso, F. (2023). Pollutant Removal in Subsurface Flow Artificial Wetlands: A Review. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>

Nava Rojas, J., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. del R., & Reyes Velázquez, C. (2023). Remoción de Contaminantes en los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial: Una Revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>

Neira Huacchillo, Y. Y. (2020). *TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER EN CIENCIAS AMBIENTALES*. <https://repositorio.ucss.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/33171678-f163-4497-8b8a-c22ee86c33ff/content>

Osorio, N. W. (2012). pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. En *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal* (Vol. 1, Número 4).

Pacheco Roman, C. A., & Carhuaricra Solorzano, W. (2025). *Eficiencia de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal unifamiliar para el tratamiento de aguas residuales grises en Vegueta*.

Panza Panza, J. A., & Rivera Medina, M. D. (2026). *CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS POR ACTIVIDADES TURÍSTICAS Y DISEÑO DE UN SISTEMA TIPO PARA SU TRATAMIENTO EN ZONAS DE INFLUENCIA DEL PARQUE NACIONAL CAJAS*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/32021/1/UPS-CT012566.pdf>

Rabat Blázquez, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. <https://iuaca.ua.es/it/master-agua/documentos/gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

- Ramón Zamora, F., Rodríguez Guevara, J. N., Torres Rodríguez, D. G., & Yendis Colina, H. J. (2009). *USO DE AGUA RESIDUAL Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA Y BIOMASA MICROBIANA EN SUELOS DE LA LLANURA DE CORO, VENEZUELA* (Vol. 35). <https://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n2/v35n2a8.pdf>
- Romero Ferriol, C. (2022). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON AIREACIÓN FORZADA. APLICACIONES Y RENDIMIENTOS*.
- Rozo Florez, A. N. (2016). *EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA AL INCREMENTO SIMULTÁNEO DE LA CARGA HIDRÁULICA Y LA CARGA ORGÁNICA EN HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS BAJO CONDICIONES TROPICALES*. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/011d9008-b787-452b-9c35-586b796270b4/content>
- Serrano García, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/a11b4efe-36f7-4444-bdff-aa7b47ea3b33/content>
- Veloz Romero, D. P. (2024). «Análisis del comportamiento del nitrógeno en los humedales artificiales del tancat de la Pipa en la Albufera de Valencia, España».

Lista de abreviaturas

ANA: Autoridad Nacional del Agua

APHA: American Public Health Association

BOD / DBO5: Demanda Bioquímica de Oxígeno (a 5 días)

COD / DQO: Demanda Química de Oxígeno

CE: Conductividad Eléctrica

CVC: Coeficiente de Variación de Caudal

FWS: Humedal de Superficie Libre

(Free Water Surface)

HSSF: Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal (Horizontal Subsurface Flow)

ICP-OES: Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente

INACAL: Instituto Nacional de Calidad – Perú

LMP: Límites Máximos Permisibles

MAC: Material de Arrastre y Contaminación

MINAM: Ministerio del Ambiente – Perú

NMP: Número Más Probable

OD: Oxígeno Disuelto

pH: Potencial de Hidrógeno

QA/QC: Aseguramiento y Control de la Calidad (Quality Assurance / Quality Control)

SST: Sólidos Suspendidos Totales

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

Glosario

Afluente: Agua residual que ingresa a un sistema de tratamiento.

Carga orgánica: Cantidad de materia orgánica presente en el agua residual, generalmente expresada en términos de DBO o DQO.

Conductividad: Medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, relacionada con la concentración de sales disueltas, expresada en $\mu\text{S/cm}$.

DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno): Cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica en el agua.

DQO (Demanda Química de Oxígeno): Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua.

Efluente: Agua tratada que sale de un sistema de tratamiento.

Eutrofización: Proceso de enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, que provoca el crecimiento descontrolado de algas y deterioro de la calidad del agua.

Humedal artificial: Sistema de tratamiento que utiliza procesos naturales, como la acción de plantas, microorganismos y sustrato, para depurar aguas residuales.

Materia orgánica: Sustancias de origen biológico presentes en el agua que pueden ser degradadas por microorganismos.

Nitrificación: Proceso biológico mediante el cual el amonio se transforma en nitratos en presencia de oxígeno.

Desnitrificación: Proceso biológico en condiciones anóxicas mediante el cual los nitratos se reducen a nitrógeno gaseoso.

Oxígeno disuelto (OD): Cantidad de oxígeno presente en el agua, fundamental para la vida acuática y los procesos biológicos.

Sólidos suspendidos: Partículas presentes en el agua que no están disueltas y pueden ser retenidas por filtración.

Tiempo de retención hidráulica (TRH): Tiempo promedio que el agua permanece dentro de un sistema de tratamiento.

ANEXOS

Anexos

Panel fotográfico

Cálculos del humedal

Resultados de laboratorio

Planos

- **Plano de ubicación**
- **Croquis los elementos**
- **Diseño de humedales**
- **Topografía de suelos (ArcGIS)**

ANEXO A

Panel Fotográfico

8.1. Panel fotográfico

Fotografía 1.

Diagnóstico de campo



Fotografía 2.

Diagnóstico de campo en el tramo del río de Alameda



Fotografía 3.

Diagnóstico de la contaminación en el tramo del río Alameda



Fotografía 4.

Trazo y replanteo para los humedales artificiales



Fotografía 5.

Excavación de los humedales artificiales



Fotografía 6.

Trazo de pendientes de los humedales



Fotografía 7.

Colocación de arena gruesa (2da capa de filtración)



Fotografía 8.

Construcción del prototipo de desarenador



Fotografía 9.

Traslado de plantas (Carrizo)



Fotografía 10.

Colocación de la planta Achira en el primer humedal



Fotografía 11.

Zona de decantación (Prototipo de desarenador)



Fotografía 12.

Zona de muestro



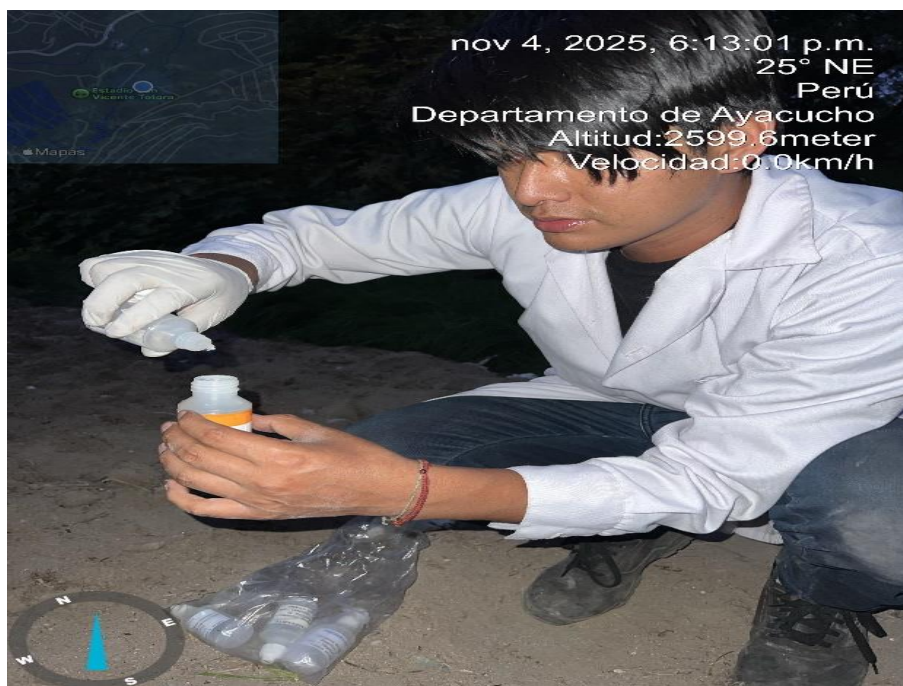
Fotografía 13.

Funcionamiento de los humedales artificiales



Fotografía 14.

Recolección de muestra (Uso del preservante)



Fotografía 15.

Toma de muestra post tratamiento



Fotografía 16.

Evidencia de la influencia de la planta para el tratamiento.



Fotografía 17.

Construcción del sistema terminado



Fotografía 18.

Verificación del sistema del humedal



ANEXO B

Cálculos del humedal

8.2. Cálculos del humedal

8.2.1. Aforo

Datos:

- Tiempo recopilado

$$t_1 = 14.5, \quad t_2 = 14.4, \quad t_3 = 14.4, \quad t_4 = 13.8, \quad t_5 = 14, \quad t_6 = 14.6$$

$$T = \frac{14.5 + 14.4 + 14.4 + 13.8 + 14 + 14.6}{6}$$

$$T = 14.3 \text{ min}$$

- Volumen de balde: $V = 20 \text{ L}$
- Caudal

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

$$Q = \frac{20}{14.3}$$

$$Q = 1.40023 \text{ L/min}$$

$$Q = \frac{1.40023 * 86400}{60000}$$

$$Q = 2.01634 \text{ m}^3/\text{día}$$

8.2.2. Humedal subsuperficial

- Caudal de diseño $Q = 2.01634$
- DBO Afluente, $C_o = 60.66 \text{ mg/l}$
- DBO Efluente, $C_e = 15 \text{ mg/l}$

8.2.2.1. Eficiencia de remoción

$$DBO \text{ remoción} = \frac{DBO \text{ Afluente} - DBO \text{ Efluente}}{DBO \text{ Afluente}}$$

$$DBO \text{ remoción} = \frac{60.66 - 15}{60.66}$$

$$DBO \text{ remoción} = 0.753 \text{ mg/l}$$

8.2.2.2. Dimensionamiento

- Constante para 20°C, $K_{20} = 0.23$
- Altura adoptada: 0.60 m
- Porosidad del suelo, $n = 0.436$
- Pendiente $S = 5\%$
- Temperatura = 19.80 °C
- Constante corregida con temperatura DBO

$$Kt = K_{20} * 1.06^{(T_1 - T_2)}$$

$$Kt = 0.23 * 1.06^{(19.80 - 20)}$$

$$Kt = 0.227$$

- Tiempo de retención hidráulico

$$TRH \text{ calculado} = \frac{\ln \frac{C_e}{C_o}}{Kt}$$

$$TRH \text{ calculado} = \frac{\ln \frac{60.66}{15}}{0.23}$$

$$TRH = 6.15 \text{ día}$$

- Área superficial

$$AS = \frac{\ln \frac{C_o}{C_e} * Q}{K * d * n}$$

$$AS = \frac{3.60 * 1.008}{0.6 * 0.436}$$

$$AS = 23.686 \text{ m}^2$$

Para 2 humedales

- Ancho

$$H = \left(\frac{23.686}{2} \right)^{0.5}$$

$$H = 3.44 \text{ m}$$

- Largo

$$L = 3.44 * 2$$

$$L = 6.9 \text{ m}$$

- Número de plantas en el humedal

$$NP = \frac{12.016}{0.25 * 0.866}$$

$$NP = 55.50$$

8.3. Cálculo del área total por cada unidad.

$$As_{unidad} = \frac{23.686}{2} = 11.843m^2$$

Manteniendo la misma relación largo: ancho=2:1 para cada unidad

$$Anc * L = Anc * (2 * Anc)$$

$$2 * Anc^2 = 11.843$$

$$Anc^2 = 5.9215$$

$$Anc = 2.43$$

$$L = 2 * 2.43$$

$$L = 4.86m$$

$$As_{total} = 11.843 * 2 = 23.686m^2$$

ANEXO C

Resultados de laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE INVESTIGACION EN PASTOS Y GANADERIA
LABORATORIO DE SUELOS Y ANALISIS FOLIAR

Jr. Abraham Valdelomar N° 249 – Telf. 315936 966942996

Ayacucho – Perú

“Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana”

Región : Ayacucho HR: 00137
Provincia : Huamanga
Distrito : Jesús de Nazareno
Comunidad : Centro Poblado de Totorá
Proyecto : “Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno - Ayacucho, 2026”
Solicitante : Roy Roger Robles Quicaña

ANALISIS FISICO DE SUELO

Muestra	Humedad (%)	Densidad Aparente (g/cc)	Porosidad (%)
01	22.6	1.28	43.6

Ayacucho, 12 de Setiembre del 2025.

LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS
PLANTA AGUAS Y FERTILIZANTES
RESPONSABLE

Juan B. Girón Molina
C.I.P. 77120



Ao: Arenoso; Ao-Fr: Arena franca; Fr-Ao: Franco arenosos; Fr: Franco; Fr-L: Franco limoso; L: Limoso; Fr-Ar-Ao: Franco arcillo arenoso; Fr-Ar: Franco arcilloso; Fr-Ar-L: Franco arcillo limoso; Ar-Ao: Arcillo arenoso; Ar-L: Arcillo limoso; Ar: Arcilloso

Organismo Internacional de Acreditación - IAS

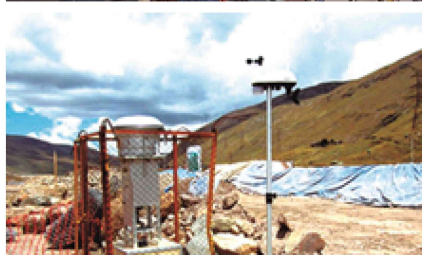
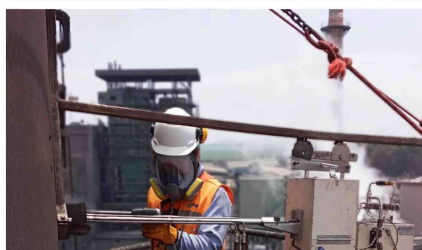
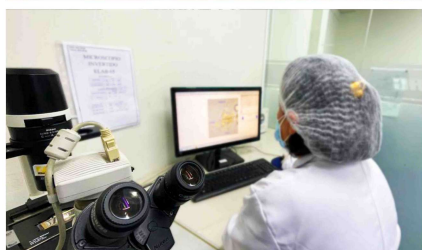
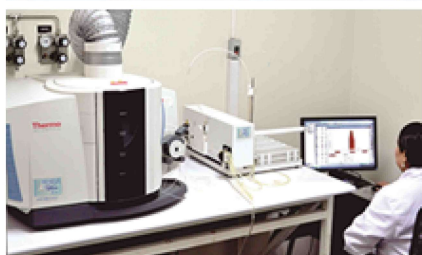
Registro N° LE-047

Testing Laboratory TL-829 y TL-951

Dirección de Acreditación INACAL

ISO / IEC - 17025

NTP - ISO / IEC 17025:2017



COTIZACIÓN N° 2025-09VQ-8-1

CLIENTE:

BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Brinda servicios de análisis y muestreo con el respaldo de la acreditación bajo la NORMA ISO/IEC-17025. Acreditado para INACAL-DA (Organismo Nacional de Acreditación) y el Organismo Internacional de Acreditación-IAS (sede en Estados Unidos). Ambas organizaciones cuentan con reconocimiento internacional por ser parte de los acuerdos de Reconocimiento Multilateral con ILAC e IAF.

- **Análisis y Muestreos Ambientales:** Agua, Hidrobiología, Suelo, Sedimentos, Lodos, Calidad de Aire, Emisiones - fuentes fijas.
- **Análisis y Muestreo Ocupacionales:** Agentes físicos (Estrés térmico, Iluminación, Radiaciones no ionizantes), Agentes químicos (material particulado, asbesto, sílice cristalina y otros), Agentes Biológicos (plaqueo ambiental, muestreo por impactador).
- **Control de Procesos** (análisis de superficies).
- **Análisis de Aire comprimido** (métodos ISO 8573)
- **Análisis Acústicos Ambiental y Ocupacional.**
- **Vibraciones:** Ocupacionales y en Edificaciones.
- **Campos Electromagnéticos:** IEEE 644-2019, IEC 61786-2, UNE-EN 62110.
- **Sala Limpia (muestreo y análisis):** de acuerdo a ISO 14644
- **Estudios Ergonómicos y psicosocial** (ERGO/IBV, REBA, OWAS, OCRA-Check List).
- **Análisis de Juguetes y útiles de escritorio:** NTP 324.001 y UNE-EN-71
- **Análisis de Envases Plásticos en contacto con alimentos:** Migración específica, Migración global, Monómeros (NTP 399.163, UNE-EN 1186, EN 13130).
- **Análisis Toxicológicos en productos químicos (Registro Sanitario):** Toxicidad dérmica, Oral e inhalatoria, Enfrentamiento Microbiano, entre otros.
- **Análisis de Toxicidad en lodos (DS 015-2017 Reglamento para reaprovechamiento de lodos PTAR):** Biosólidos.
- **Análisis de Residuos Sólidos:** Toxicidad, Corrosividad, Inflamabilidad, Reactividad

ASEGURAMIENTO DE LA VALIDEZ DE LOS RESULTADOS

SAG S.A.C. para asegurar la confiabilidad de los resultados, cuenta con personal calificado con amplia experiencia, equipos de última generación, aplica metodologías actualizadas Nacionales e Internacionales, participa ampliamente en competencias interlaboratorio para asegurar su competencia técnica.

CONFIDENCIALIDAD

Servicios Analíticos Generales se compromete en mantener la confidencialidad de la información proporcionada por el cliente o generada durante la realización del ensayo y/o muestreo, a excepción de la información que se encuentra disponible públicamente, o por acuerdo entre el cliente y SAG o cuando sea requerido por ley (previa notificación al cliente, salvo que esté prohibido por ley).

COTIZACIÓN N° 2025-09VQ-8-1

CLIENTE:	BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI	FECHA:	2025-09-08
DIRECCIÓN:	Jr. Untiveros N 781 - - AYACUCHO -	RUC:	10774166934
TELÉFONO:	951297445	E-MAIL:	brayanjhomer1234@gmail.com
CONTACTO:	BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI		
Referencia / Procedencia :	ANÁLISIS DE AGUA		
Facturar a:	BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI		

AGUAS

ANÁLISIS	METODOLOGÍA	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	LÍMITE DE DETECCIÓN	CONDICIÓN	Matriz	UNIDAD	N° DE MUESTRAS Y/O ÁNALISIS	PRECIO UNITARIO (S/)	PRECIO TOTAL (S/)
ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS									
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO5)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed., 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	no aplica	2.00	Acreditado por INACAL-DA (SEDE LIMA1)	AN, AR, ACH, Asa	mg/L	1		
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed., 2023..Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	10.0	3.0	Acreditado por INACAL-DA (SEDE LIMA1)	AN, AR, ACH,	O2 mg / L	1		
Sólidos suspendidos totales (TSS)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed., 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	3.00	0.90	Acreditado por INACAL/IAS	INACAL: ACH, AN, AR, Asa// IAS: APr	mg/L	1		
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed., 2023. pH Value. Electrometric Method.	no aplica	no aplica	No Acreditado	ACH, AN, AR, Asa	Unid. pH	1		
Oxígeno Disuelto OD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-O C. 24th Ed., 2023. Oxygen (Dissolved). Azide Modification.	1.67	0.5	Acreditado por INACAL-DA (SEDE LIMA1)	ACH, AN, AR, Asa	O2 mg / L	1		
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed., 2023.. Conductivity. Laboratory Method.	no aplica	no aplica	Acreditado por INACAL-DA (SEDE LIMA1)	ACH, AN, AR, Asa	µS/cm	1		
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed., 2023. Turbidity. Nephelometric Method.	0.40	0.12	Acreditado por INACAL-DA (SEDE LIMA1)	ACH, AN, AR, Asa	NTU	1		
Nitrógeno total (persulfato)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N C, 24th Ed., 2023. Nitrogen. Persulfate Method.	0.15	0.045	Acreditado por INACAL/IAS	Inacal: AN // IAS: ACH,, APr, Asa, AR	NO3- - N mg / L	1		
Fósforo (Phosphorus): Total phosphorus (fósforo total)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Phosphorus. Part 4500-P B Sample Preparation. / Part 4500-P E. Ascorbic Acid Method. 23rd Ed. 2017.	0.013	0.004	Acreditado por IAS	ACH, AN, AR, Asa, APr	P mg / L	1		

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS									
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 24th Ed. 2023. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant coliform test (EC medium).	otras aguas: 1.8++ agua potable: 1.1+ +	no aplica	Acreditado por INACAL/IAS	INACAL: ACH, AN, AR, Mar // IAS: ACH, AN, AR, Asa, APr	NMP/100mL	1		

--GASTOS OPERATIVOS Y/O ADMINISTRATIVOS--					
CONCEPTO	DESCRIPCION	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (S/)	CANTIDAD	SUB TOTAL (S/)
GASTOS OPERATIVOS					
Movilidad hacia la agencia de transportes por envío de carga	1	Und		1	
Movilidad por recojo de carga desde agencia	1	Veces		1	
Flete por envío de cooler	1	Und		1	

Observaciones:

* EL CLIENTE DEBE DEJAR SUS MUESTRAS EN NUESTRO LABORATORIO DE LIMA, SI LO ENVIA POR AGENCIA SE PUEDE REGOGER (COSTO ADICIONAL)
 * FIRMAR LA CADENA DE CUSTODIA, INCLUYENDO EL NRO DE COTIZACION.
 * SAG, LE BRINDARA LOS MATERIALES PARA LA TOMA DE MUESTRA, COMO COOLER, FRASCOS, GUANTES Y CADENA DE CUSTODIA, EN NUESTRA SEDE DE LIMA, SI ES ENVIO PARA PROVINCIA (COSTO ADICIONAL)
 * MATRIZ AGUA NATURAL

* En caso de que se presenten problemas o gastos no previstos en el curso de la prestación de los servicios, SAG deberá informar al respecto al cliente y tendrá derecho al cobro de los honorarios adicionales para cubrir el tiempo y los costos adicionales en que haya incurrido obligatoriamente para prestar los servicios.

Observaciones para clientes que toman sus muestras

* Las muestras ingresadas deben estar acompañadas por la [copia de la cotización del servicio y cadena de custodia](#) con los datos completos que se solicita, caso contrario las muestras no serán aceptadas.
 * Las mediciones de pH realizadas por el cliente pierden la acreditación porque el tiempo de perecibilidad del ensayo es de 15 minutos, por lo cual el informe de ensayo tendrá la indicación "El resultado de pH se encuentra fuera del alcance de acreditación otorgada por INACAL, debido a que la muestra no es idónea para el ensayo". Se recomienda optar por pH medición en campo para que no pierda la condición de acreditado.
 * Las mediciones de temperatura, cloro libre, cloro total, serán reportadas como no acreditadas ya que se trata de ensayos in situ.
 * No se considera como muestra ingresada en los informes de análisis aquellos puntos que el cliente registra en las cadenas como punto seco.
 * Para los análisis en general y con la finalidad que no sean considerados como no idóneos a su ingreso, seguir las indicaciones de tiempos, preservación y volúmenes indicados en el "DA-008 Indicaciones de toma de muestras clientes y DA-065 Indicaciones para toma de muestra por el cliente y condiciones de recepción para aire y salud ocupacional".
 * Los envíos a Lima deben ir dirigidos a: **Percy Tafur Goñás DNI:40746045 y SERVICIOS ANALITICOS GENERALES S.A.C. Av. Naciones Unidas 1565 Urb. Chacra Ríos Norte – Cercado de Lima, RUC: 20514746355.**
 * El servicio de recojo del flete por parte de SAG desde la agencia, es de lunes a viernes. En caso el cliente haga envíos fuera del horario indicado, debe informar a su ejecutivo de ventas **con 2 días de anticipación como mínimo**. Caso contrario las muestras no serán recogidas y de haber muestras perecibles, el laboratorio no se responsabiliza que dichos resultados no alcancen la acreditación.
 * En el caso de enviar muestras sábados y domingos, remitirlas a nombre de **Luis Alberto Poma Pando, DNI 10007646 y SERVICIOS ANALITICOS GENERALES S.A.C. Av. Naciones Unidas 1565 Urb. Chacra Ríos Norte – Cercado de Lima, RUC: 20514746355.**
 * Para envíos de muestras **vía aérea**, de **lunes a domingo** remitirlas a nombre de **SERVICIOS ANALITICOS GENERALES S.A.C. Av. Naciones Unidas 1565 Urb. Chacra Ríos Norte – Cercado de Lima, RUC: 20514746355.**

IMPORTANTE:

- *Servicios Analíticos Generales S.A.C., podrá cambiar los métodos de ensayo por razones técnicas y/o operativas según la matriz de las muestras. La versión de la norma podrá cambiar según la normativa vigente. La condición de análisis acreditado está directamente relacionada a las matrices declaradas en el alcance de la acreditación.
- *La cotización esta elaborada en base a costos unitarios de los análisis. Por ningún motivo se debe interpretar que estos se encuentran referidos a un reglamento o legislación en particular, que agrupe a más de un análisis para un punto de muestreo (estación de muestreo).
- *El laboratorio ofrece diferentes métodos para un mismo análisis con diferencia en costos. El usuario (cliente), es responsable de la selección del método de acuerdo a la legislación que requiera aplicar.

MUESTRA DIRIMIENTE:

Para los servicios de VMA, D.S.-010-2019-VIVIENDA (usuario no doméstico) y otros servicios, el cliente tiene la facultad de solicitar la muestra dirimente, de acuerdo a la obligación que implica la legislación vigente. Este servicio tiene un costo adicional y será plasmado en la cotización en el campo de observaciones.

MUESTREOS REALIZADOS POR EL LABORATORIO:

- *los muestreos por parte de los analistas de campo de SAG, solo incluye las labores de instalación de equipos y mediciones in situ.
- *Actividades de muestreo que conlleven a las siguientes actividades serán realizadas por personal del cliente:
 - retiro de tapas de buzón que requieran herramienta particulares.
 - excavación de zanjas para toma de muestras de suelos (calicatas).
- * los analistas de campo de SAG, pueden paralizar la actividad de muestreo de observar condiciones inseguras para realizar su trabajo, ya que conlleva a riesgo de su integridad física (trabajos en altura, descenso a zonas accidentadas, etc). Esta decisión será comunicada de inmediato al ejecutivo de ventas para ser comunicado al cliente.

EMISIÓN DE INFORMES Y/O CERTIFICADOS :

- * Los INFORMES DE ANÁLISIS PRELIMINARES son enviados vía digital de acuerdo al tipo de análisis: Análisis fisicoquímicos de aguas: 9 días útiles; Análisis cromatográficos: 12 días útiles; Análisis Hidrobiológicos: de 15 a 21 días; Análisis de Suelos, Sedimentos, Lodos: 12 días útiles; Análisis de Emisiones-fuentes fijas: 12 días útiles; Análisis de Calidad de Aire: 9 días útiles y hasta 35 días ensayos con técnica de difusión pasiva; Análisis Ocupacionales: 9 días útiles y 12 días útiles los cromatográficos; Análisis de juguetes e útiles de escritorio: de acuerdo a la cantidad de muestras: 9-15 días útiles ó acuerdo con el cliente; Análisis Toxicológicos, Ecotoxicológicos, Biodegradabilidad: de acuerdo al período de duración de los ensayos; Análisis de Envases en Contacto con Alimentos (migraciones), plástico, papel, tinta, etc: entre 15 y 20 días de acuerdo al ensayo; Análisis Control de Procesos (análisis de superficies): de acuerdo a la cantidad de muestras; Análisis de Aire comprimido (químico y microbiológico); tiempo de acuerdo con el cliente; Ensayos de Mecánica de Suelos (agregados): 9-15 días; Análisis de Residuos Sólidos: 9-15 días; Análisis de Alimentos: 9 días; Fertilizantes: 10-15 días útiles; Productos Químicos: de acuerdo al tipo de análisis acordado con el cliente. EXCEPCIONES DE ENVÍO DEL DIGITAL: por acuerdo económico de pago al contado antes del envío de resultados.
- * Se remite los informes y/o certificados preliminares vía digital en condición de borrador solicitando que el cliente confirme sus datos y demás información. Una vez recibida la conformidad de impresión vía correo, se procede al envío del informe final vía digital (a partir del 01 de enero del 2023 los informes serán enviados en digital con firma electrónica, ya no se utilizará informes en físico). Los informes son enviados de acuerdo a las condiciones de pago.
- * Los resultados son reportados en: 01 informe para ensayos de agua y suelo, 01 informe para calidad de aire, 01 informe de ruido, 01 informe para emisiones fuentes fijas, 01 informe de salud ocupacional, 01 informe de juguetes/útiles de escritorio, 01 informe o certificado para plásticos y tintas, 01 informe por productos químicos. El cliente podrá solicitar reporte en más de un informe para una de las matrices previa comunicación al ejecutivo de ventas antes de la impresión del informe, el cual tendrá un costo adicional.
- * Los informes de ensayo no incluyen interpretación de resultados ni cometarios.
- * El servicio de análisis no incluye emisión de documentación bibliográfica de los análisis realizados ni resumen de los métodos aplicados.
- *Cuando un cliente solicite en el servicio DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD: regla de decisión (los resultados obtenidos +/- la incertidumbre de medición), esta será previamente acordado con el EJECUTIVO DE VENTAS para evaluar si procede y acordar los costos del mismo. Dichos acuerdos deberán redactarse en "OBSERVACIONES" de la cotización. Nota: de no ser conformes los resultados no se emitirá la conformidad.
- *Cualquier cambio posterior a la emisión electrónica del informe será remitido como INFORME MODIFICADO de acuerdo a los lineamientos de la ISO/IEC 17025, el mismo tendrá un cobro adicional por la emisión del nuevo informe digital.

Para consultas sobre los resultados de análisis, fecha de entrega del informe de ensayo, quejas, sugerencias u otros; por favor dirigir su comunicación al área de Atención al Cliente (atencionalcliente@sagperu.com / 425-6885 anexo: 129).

Se encuentra disponible en la web site, el Procedimiento de Atención y Tratamiento de Quejas PC-005, ingresar a https://www.sagperu.com/index_sag.html

Referencia:
Matrices en Aguas

ACH: Agua de uso y consumo humano (agua potable, agua de bebida, agua envasada, agua de piscina).

AR: Agua residual (agua residual doméstica o industrial)

APr: Agua de proceso (agua de caldero, circulación o enfriamiento, agua destilada, desionizada, osmotizada).

Asa: Aguas salinas (agua de mar, salmuera, aguas salobres)

AN: Aguas naturales (aguas de río, laguna, agua superficial y de lluvia)

En color azul se encuentran los Métodos Acreditados ante INACAL-DA y/o Organismo Internacional de Acreditación IAS bajo norma ISO/IEC 17025

En color rojo los Métodos que no realiza el Laboratorio y que no son acreditados, que son tercerizados.

En color verde los Métodos Acreditados ante INACAL-DA y el Organismo Internacional de Acreditación IAS que serán subcontratados.

I. NOMENCLATURA DE NORMAS:

ASTM: American Society for Testing and Materials.

ISO: International Organization for Standardization.

OSHA: Occupational Safety and Health Administration.

EPA: Environmental Protection Agency.

NTP: Norma Técnica Peruana.

NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health.

SW-846: EPA Waste's Official Compendium of Analytic and Sampling Methods that have been evaluated and approved for use in complying with RCRA regulations.

II. CONDICIONES DE PAGO

a.- PAGO AL CONTADO Dicho pago deberá realizarse con cheque a nombre de SERVICIOS ANALITICOS GENERALES SAC, Transferencia o depósito en nuestras cuentas indicadas abajo, no se aceptarán pagos en efectivo. Adicionalmente se enviará el voucher de pago escaneado indicando el N° de cotización por correo electrónico a ecomercial06@sagperu.com y ventas@sagperu.com

b.- Toda constancia de transferencia o depósito debe indicar la **RAZÓN SOCIAL y N° RUC** del cliente, así como el **N° FACTURA** y **COTIZACIÓN DEL SERVICIO APROBADO**, **caso contrario no se podrá identificar el pago**.

Banco	Moneda	Nº de Cuenta Corriente	Código de Cuenta Interbancario
LIMA			
Banco de Crédito del Perú.	Soles	191-2401338-0-38	002-191-002401338038-51
Banco de Crédito del Perú.	Dólares	193-1572995-1-46	00219300157299514615
BBVA Continental.	Soles	0011-0140-0100074186-16	011-140-000100074186-16
Scotiabank.	Soles	000-8734577	009-073-000008734577-83
Banco de la Nación del Perú.	Soles	0015000244	01801500001500024482
Banco Pichincha	Soles	053-001578556376	035-053-001578556376-86
Banco Pichincha	Dólares	000-001485676053	035-000-001485676053-94
*Cuenta Corriente de Detracciones (12%)			
Banco de la Nación del Perú.	Soles	00-021-007587	

* Sistema de Pago de Obligaciones Tributarias D.L. No. 940 (12%). Aplicable por ingresos mayores a S/.700.00. **Por ley, es obligación del cliente realizar el pago de la detracción a nuestra cuenta en el Banco de la Nación.**

c.- Para depósitos en efectivo o abonos en cheques de otros bancos, los pagos pueden realizarse también a nivel nacional en cualquier agencia **Scotiabank, CrediScotia, Agentes, Cajeros Express SCI o Internet**. El costo por operación es potestad de la entidad bancaria.

"(**) indicar en ventanilla, de manera obligatoria que realizará un bono a Servicios Analíticos Generales **POR SERVICIO DE RECAUDACIÓN**, con la referencia del número de RUC o DNI de la empresa facturada, **caso contrario no se podrá identificar el pago**.

d.- Para pagos a través del Banco Continental indicar en ventanilla de manera obligatoria como **REFERENCIA** el número de **RUC, DNI o FACTURA** de la empresa facturada, **caso contrario no se podrá identificar el pago**.

III. CONDICIONES DEL SERVICIO:

Ver adjunto DA-057 Condiciones del servicio del laboratorio (Ver 01).

IV. ACEPTACIÓN DEL SERVICIO:

a. Remitirnos su ORDEN DE COMPRA u ORDEN DE SERVICIO como señal de aceptación a los siguientes correos: ecomercial06@sagperu.com y ventas@sagperu.com, haciendo referencia al número de cotización. De no remitirnos los documentos anteriores se da como aceptado el servicio cuando se envían los materiales o se realiza el muestreo.

Atentamente,

Alberto Cuevas
Ejecutivo Comercial
SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Central Telefónica: 425-6047 Anexo: 126

E-mail: ecomercial06@sagperu.com

Web: www.sagperu.com



CADENA DE CUSTODIA DE MONITOREO - DE AGUAS Y SUELOS

Cliente:	Roy Roger Robles Quicana	Contacto:	942490115	E-mail:	roy.robles.24@unsub.edu.pe	Telef.(s)	951297445
Lugar:	Ayacucho	Empresa:	SAG	Planta:		Proyecto:	Análisis de la calidad de agua

Carta/Cotización:	
MUESTREO POR SAG	MUESTREO POR CLIENTE

MUESTREO		PARAMETROS IN SITU	ANALISIS DE LABORATORIO	Nº Informe:
----------	--	--------------------	-------------------------	-------------

[illegible]

Observaciones de Muestreo:

Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable del muestreo: Roy Roger Dobles Quintana Recibido en laboratorio: _____
Firma(s): [Signature] Dia/Hora: _____
Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable o Supervisor en campo: _____
Firma(s): _____

Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable o Supervisor en campo: _____

Firma(s): _____

Día/Hora: _____



942490115

de la calidad de agua

ADO POR CLIENTE

[illegible]

Observaciones de Muestreo:

Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable del muestreo:

Firma(s):

Recibido en laboratorio:

Nombre(s) y Apellido(s) del Responsable o Supervisor en campo:

Firma(s):

Dia/Hora:

INFORME DE ENSAYO N° 1913051-2025
CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL	: BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
DOMICILIO LEGAL	: JR. UNTIVEROS N°781 - AYACUCHO
SOLICITADO POR	: BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
REFERENCIA	: ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA
PROCEDENCIA	: AYACUCHO
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS	: 2025-10-01
FECHA(S) DE ANÁLISIS	: 2025-10-01 AL 2025-10-07
FECHA(S) DE MUESTREO	: 2025-09-30
MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	: LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayos	Métodos	LC	Unidades
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed., 2023. pH Value. Electrometric Method.	no aplica	Unid. pH
Phosphorus (fósforo): Total phosphorus (fósforo total),	SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Phosphorus. Part 4500-P B. Sample Preparation. / Part 4500-P E. Ascorbic Acid Method. 24th Ed., 2023.	0.013	P mg/L

L.C.: Límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Agua Natural	
Matriz analizada	Agua Natural	
Fecha de muestreo	2025-09-30	
Hora de inicio de muestreo (h)	17:00	
Condiciones de la muestra	Refrigerada/ Preservada	
Código del Cliente	Punto 01	
Código del Laboratorio	25100110	
ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829		
Ensayo	Unidades	Resultados
Phosphorus (fósforo): Total phosphorus (fósforo total),	P mg/L	5.690
pH	Unid. pH	7.33*

* Ensayo no acreditado ante IAS.
Medición de pH realizada a 25°C.

Lima, 13 de Octubre del 2025.



DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

INFORME DE ENSAYO N° 1913004-2025
CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
DOMICILIO LEGAL : JR. UNTIVEROS N°781 - AYACUCHO
SOLICITADO POR : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
REFERENCIA : ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA
PROCEDENCIA : AYACUCHO
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2025-10-01
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2025-10-01 AL 2025-10-08
FECHA(S) DE MUESTREO : 2025-09-30
MUESTREADO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayos	Métodos	LC	Unidades
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed., 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	2.00 ^(b)	mg/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed., 2023. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	10.0	O ₂ mg/L
Sólidos suspendidos totales (TSS)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed., 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	3.00	mg/L
Oxígeno Disuelto OD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-O C. 24th Ed., 2023. Oxygen (Dissolved). Azide Modification.	0.5 ^(b)	O ₂ mg/L
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed., 2023. Conductivity. Laboratory Method.	---	µS/cm
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed., 2023. Turbidity. Nephelometric Method.	0.40	NTU
Nitrógeno total (persulfato)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N C, 24th Ed., 2023 Nitrogen. Persulfate Method.	0.15	NO ₃ ⁺ -N mg/L
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 24th Ed. 2023. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant coliform test (EC medium)	1.8 ^(a)	NMP/100mL

L.C.: Límite de cuantificación.
(a) Límite de detección del método para estas metodologías por ser semicuantitativas.
(b) Expresado como límite de detección del método.

DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

INFORME DE ENSAYO N° 1913004-2025 CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado		Agua Natural
Matriz analizada		Agua Natural
Fecha de muestreo		2025-09-30
Hora de inicio de muestreo (h)		17:00
Condiciones de la muestra		Refrigerada/ Preservada
Código del Cliente		Punto 01
Código del Laboratorio		25100110
ENSAYOS ACREDITADOS ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	60.660
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	191.0
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	155.40
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	4.6
Conductividad	µS/cm	986
Turbiedad	NTU	45
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	49.72
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	NMP/100mL	350 x 10 ⁶

Lima, 13 de Octubre del 2025.

INFORME DE ENSAYO N° 1914912-2025

RAZÓN SOCIAL : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
 DOMICILIO LEGAL : JR. UNTIVEROS N°781 - AYACUCHO
 SOLICITADO POR : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
 REFERENCIA : ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA
 PROCEDENCIA : AYACUCHO
 FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2025-11-14
 FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2025-11-14
 FECHA(S) DE MUESTREO : 2025-11-13
 MUESTREADO POR : EL CLIENTE
 CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayos	Métodos	LC	Unidades
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed., 2023. pH Value. Electrometric Method.	no aplica	Unid. pH

L.C.: Límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado		Agua Residual
Matriz analizada		Agua Residual
Fecha de muestreo		2025-11-13
Hora de inicio de muestreo (h)		16:50
Código del Cliente		Punto 01
Código del Laboratorio		25110855
Ensayo	Unidades	Resultados
pH	Unid. pH	6.84

Medición de pH realizada a 25°C.

Lima, 27 de Noviembre del 2025.



DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

INFORME DE ENSAYO N° 1914899-2025
CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
DOMICILIO LEGAL : JR. UNTIVEROS N°781 - AYACUCHO
SOLICITADO POR : BRAYAN ORTIZ ATAUCUSI
REFERENCIA : ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA
PROCEDENCIA : AYACUCHO
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2025-11-14
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2025-11-14 AL 2025-11-21
FECHA(S) DE MUESTREO : 2025-11-13
MUESTREADO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayos	Métodos	LC	Unidades
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed., 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	2.00 ^(b)	mg/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed., 2023. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	10.0	O ₂ mg/L
Fósforo Total o fósforo (P)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-P B, E, 24th Ed., 2023. Phosphorus. Ascorbic Acid Method.	0.013	P mg/L
Nitrógeno total (persulfato)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-N C, 24th Ed., 2023 Nitrogen. Persulfate Method.	0.15	NO ₃ ⁺ -N mg/L
Sólidos suspendidos totales (TSS)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed., 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	3.00	mg/L
Oxígeno Disuelto OD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 4500-O C, 24th Ed., 2023. Oxygen (Dissolved). Azide Modification.	0.5 ^(b)	O ₂ mg/L
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed., 2023. Conductivity. Laboratory Method.	---	µS/cm
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed., 2023. Turbidity. Nephelometric Method.	0.40	NTU
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E-1, 24th Ed. 2023. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Procedure. Thermotolerant coliform test (EC medium)	1.8 ^(a)	NMP/100mL

LC.: Límite de cuantificación.

(a) Límite de detección del método para estas metodologías por ser semicuantitativas.

(b) Expresado como límite de detección del método.

DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

INFORME DE ENSAYO N° 1914899-2025 CON VALOR OFICIAL

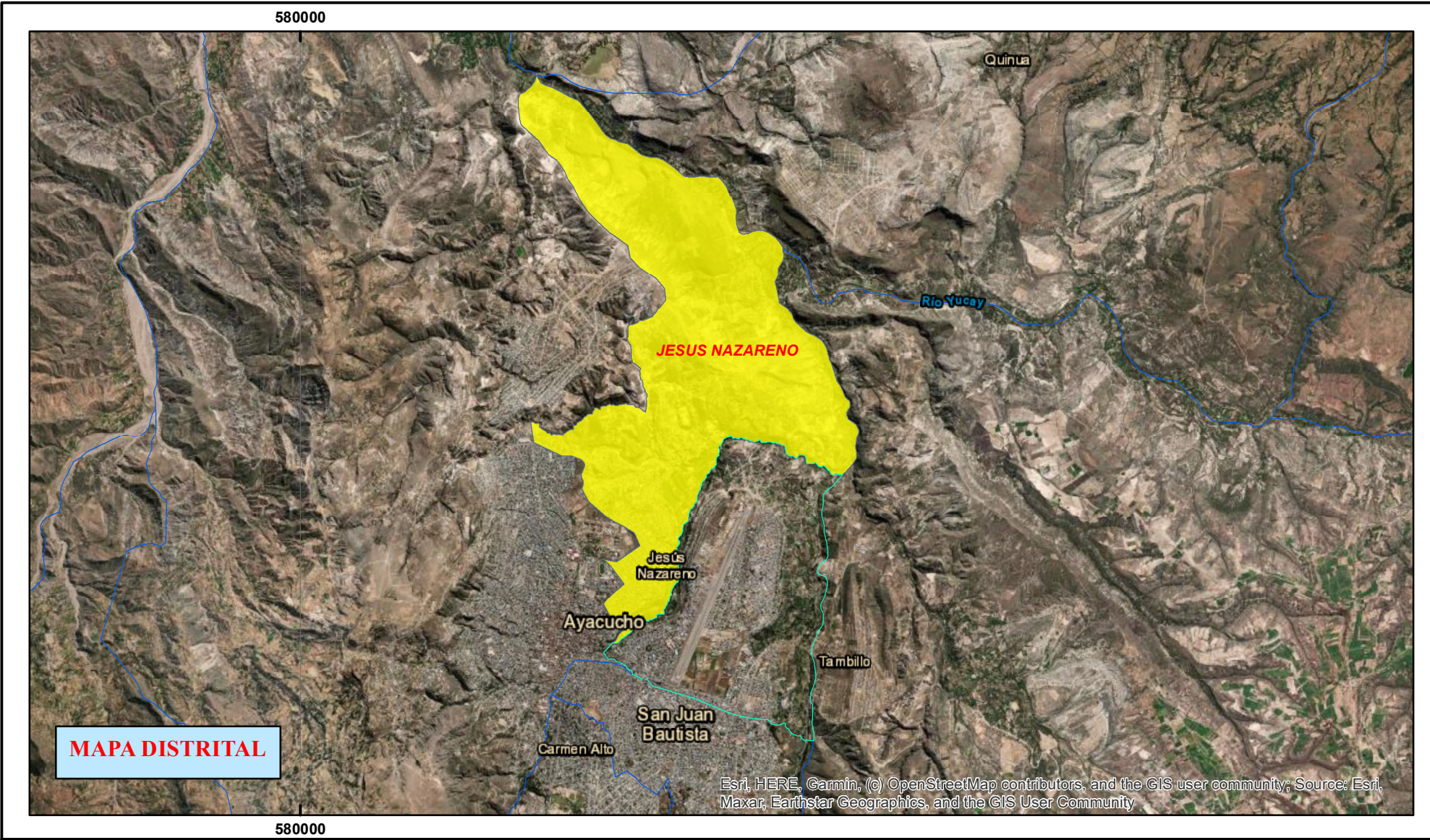
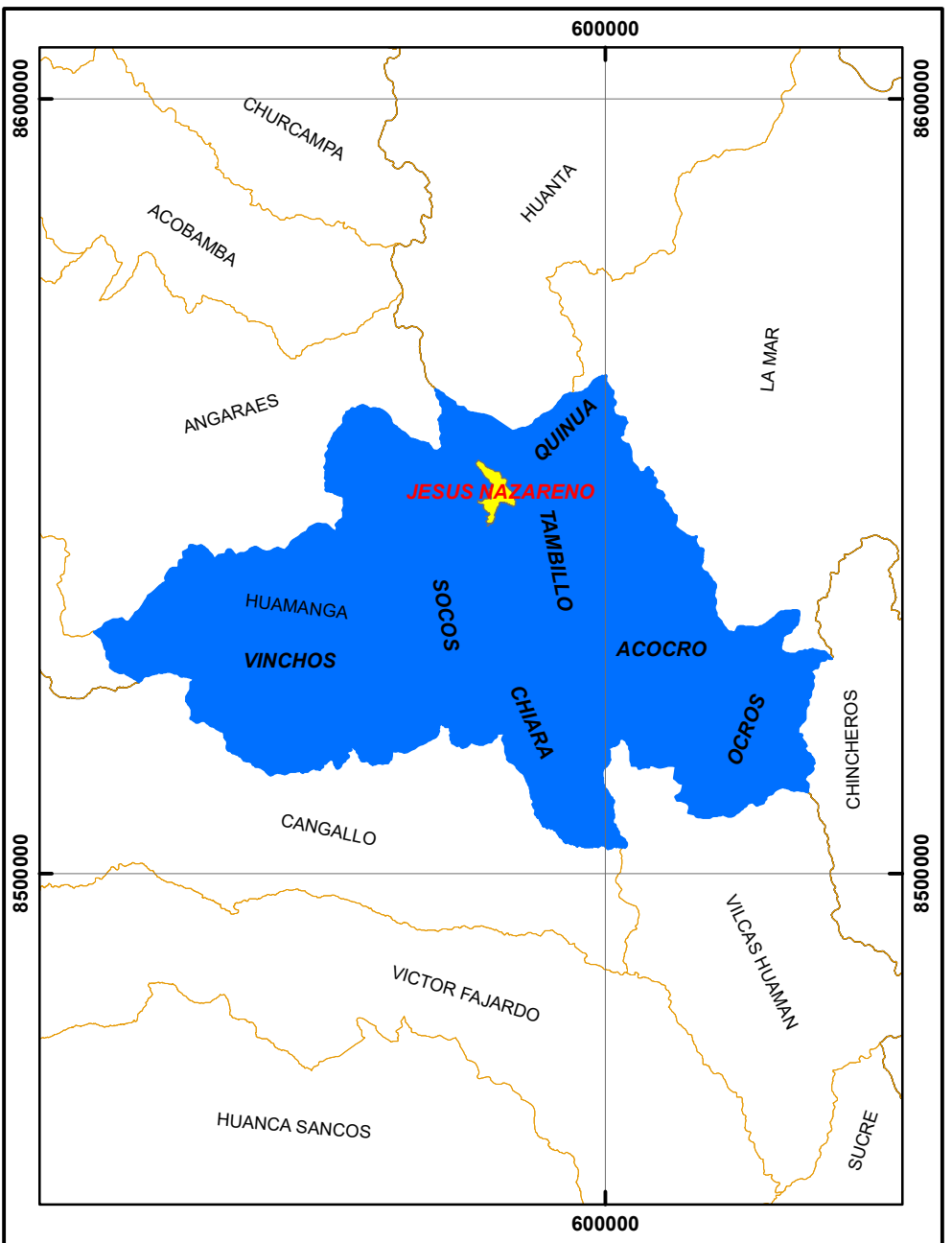
II. RESULTADOS:

Producto declarado		Agua Residual
Matriz analizada		Agua Residual
Fecha de muestreo		2025-11-13
Hora de inicio de muestreo (h)		16:50
Condiciones de la muestra		Refrigerada/ Preservada
Código del Cliente		Punto 01
Código del Laboratorio		25110855
ENSAYOS ACREDITADOS ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	63.75
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	126.7
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	5.870
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	43.28
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	31.23
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	2.1
Conductividad	µS/cm	1051
Turbiedad	NTU	18.00
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	NMP/100mL	280 x 10 ⁶

Lima, 27 de Noviembre del 2025.

ANEXO D

Planos



DISTRITO: JESUS NAZARENO E: 1/250 000



"UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Proyecto:
EV ALUACIÓ N DE LA CALIDAD DE AGUA APLICANDO
LOS HUMEDALES ART IFICIALES EN EL RÍO ALAMEDA,
DIST RIT O DE JESÚS NAZARENO, AYACUCHO."

Plano:
MAPA:
UBICACIÓN

Ubicación
Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesus Nazarenos
Lugar: Totorilla

Docente:
Ing. Norma Garcia Tucta

Asignatura:
Tesis para grado de titulo

Semestre:
2025-II

Estudiante:
Robles Quicaña Roy Roger

Diseño y dibujo:
Robles Quicaña Roy Roger

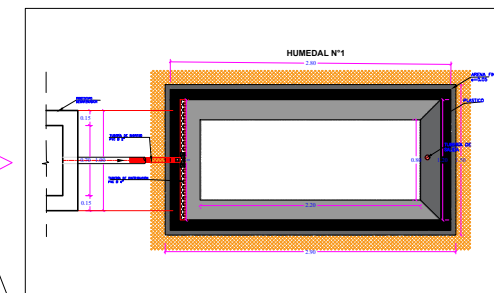
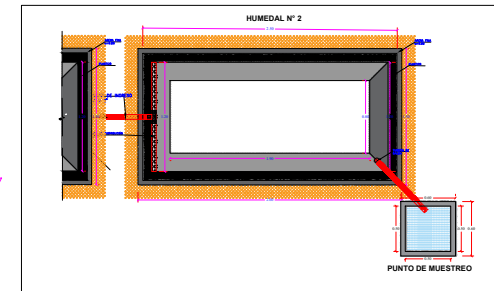
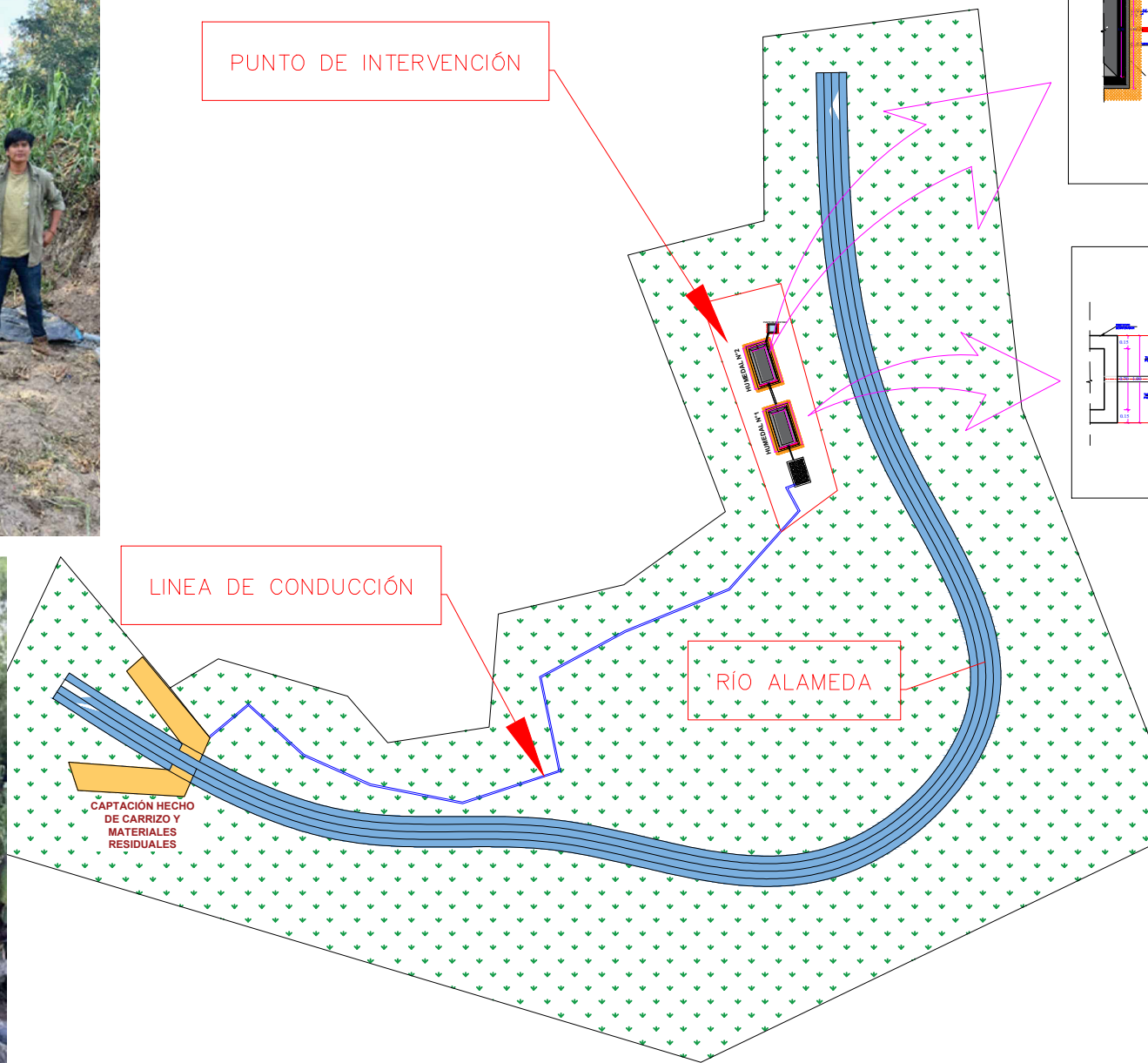
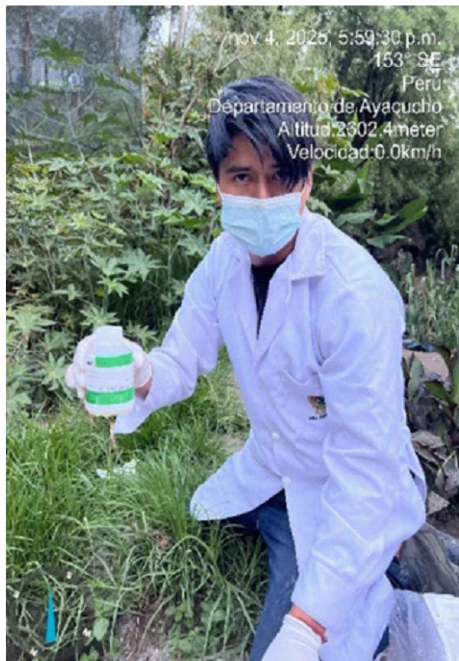
Fecha:
Diciembre 2025

Coordenadas:
UTM
WGS - 84

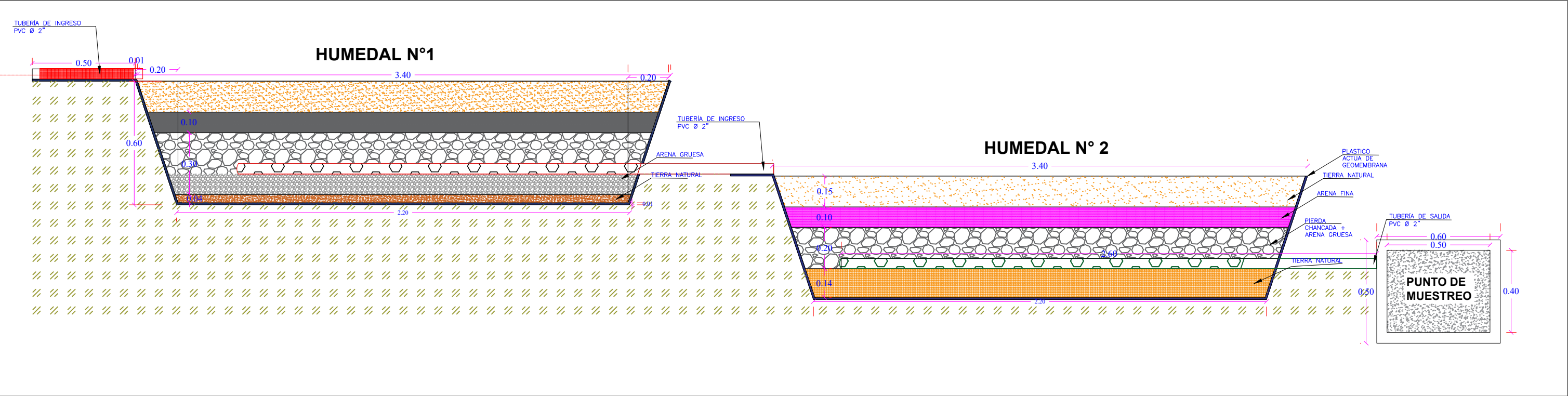
Zona:
18 S

Escala:
Indicada

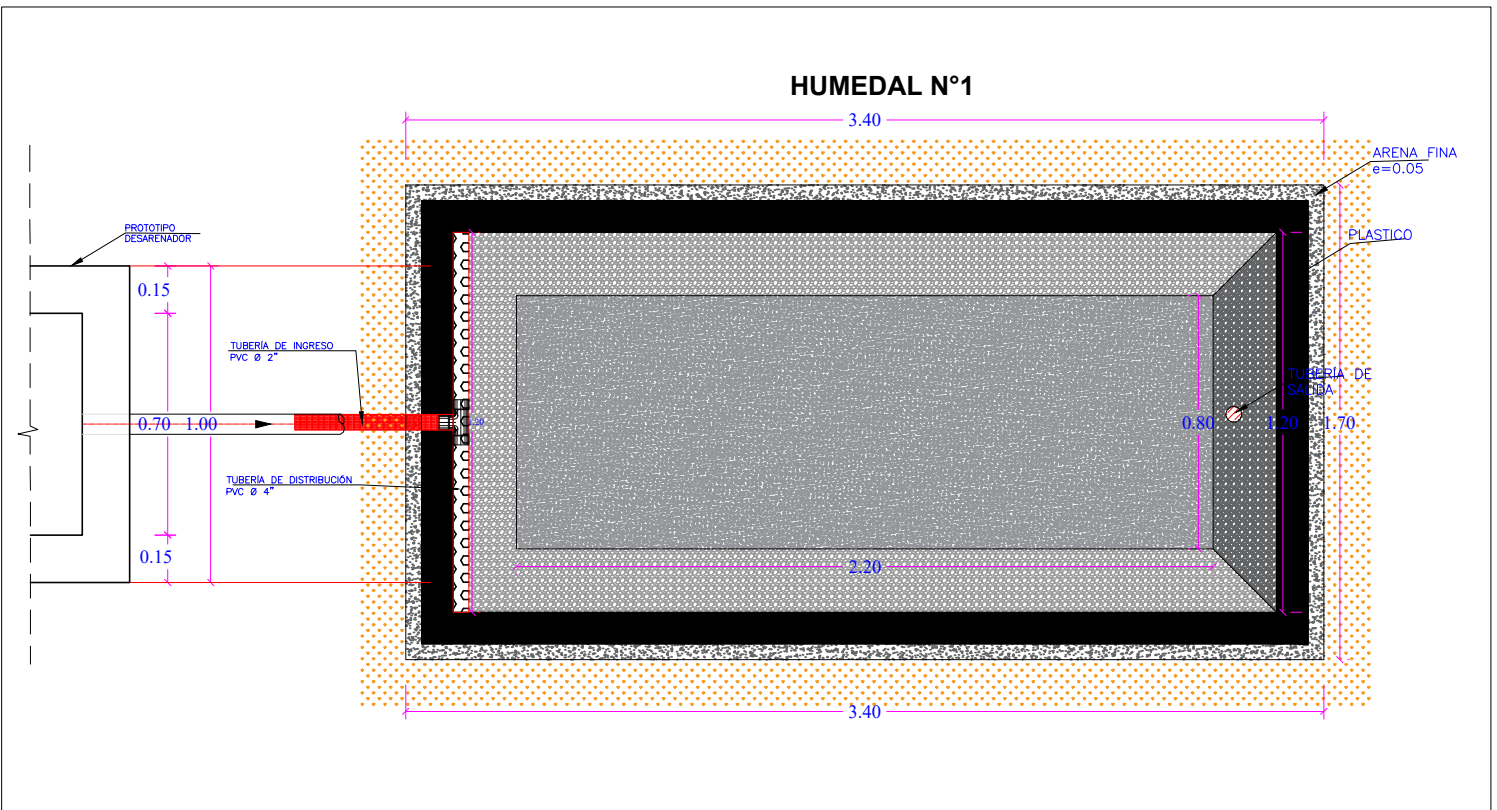
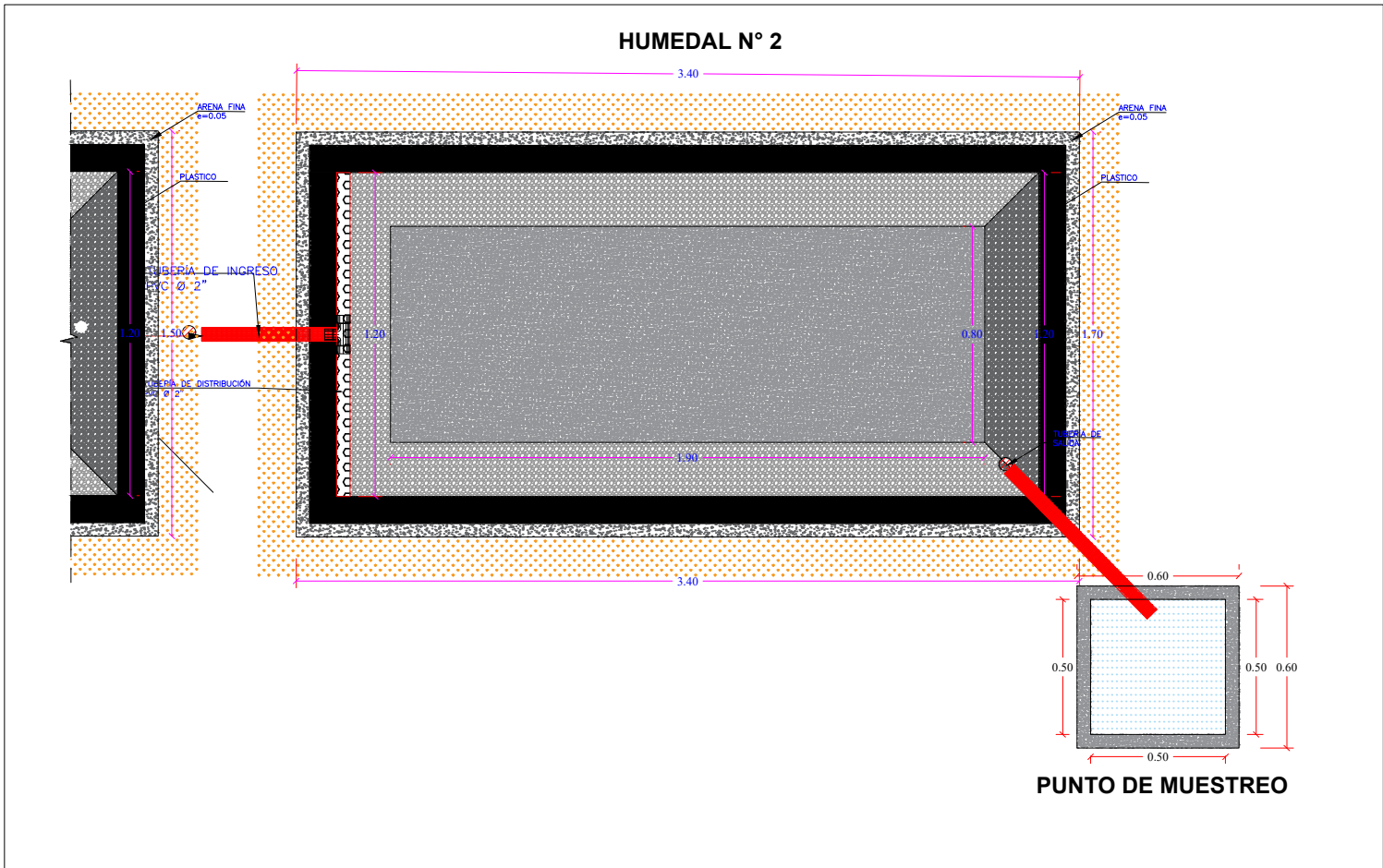
Lámina:
IA-01



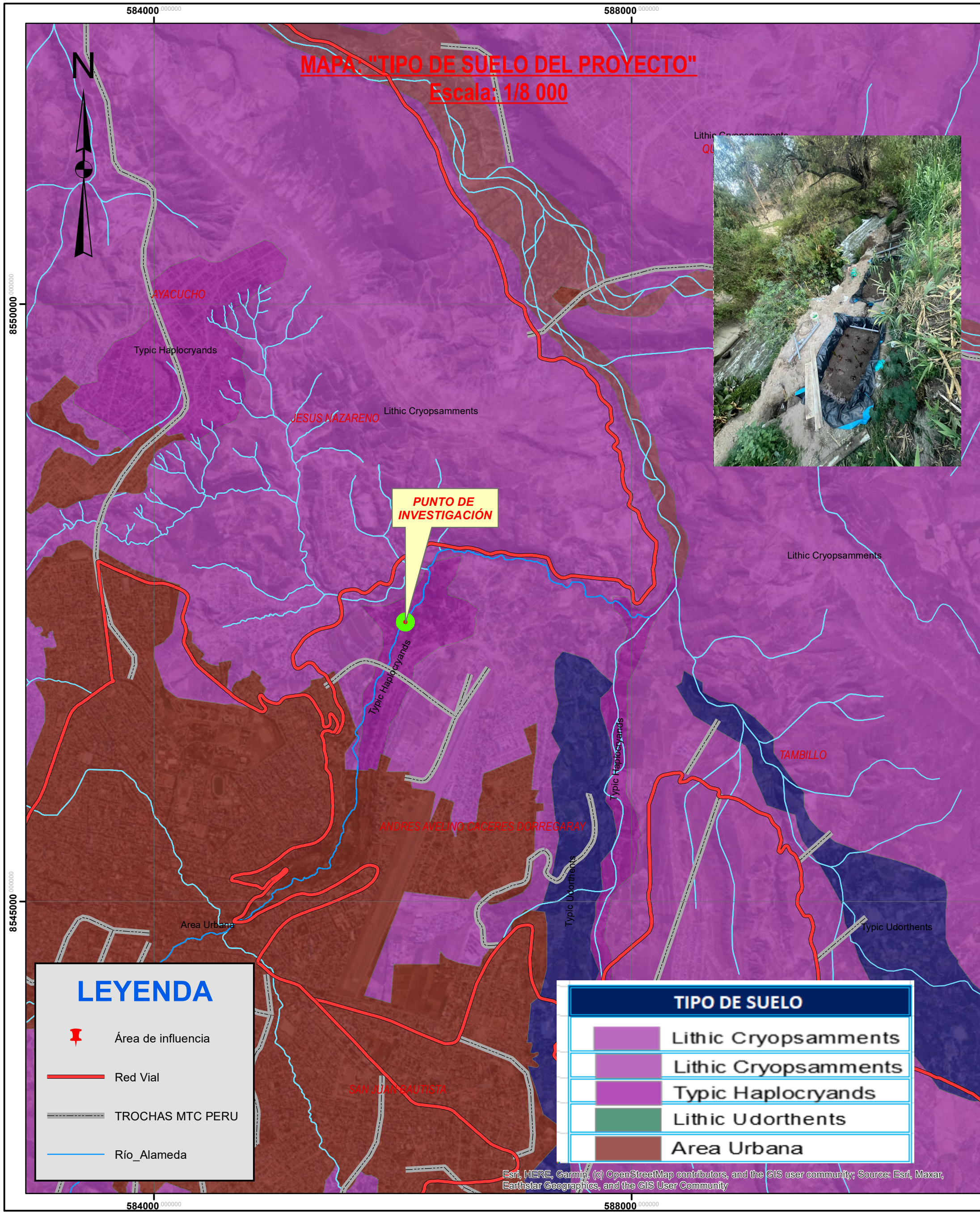
PERFIL DEL HUMEDAL



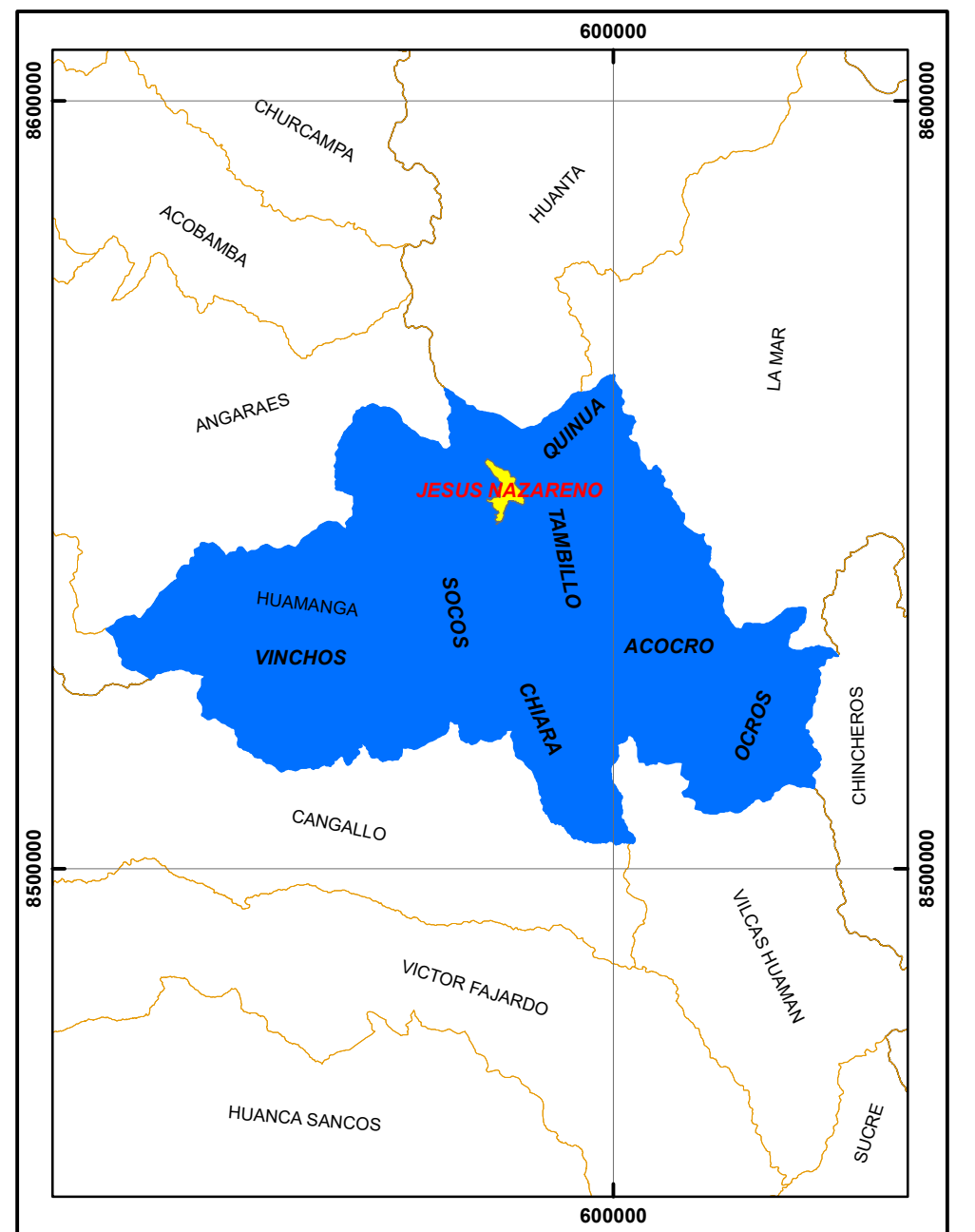
PLANO EN PLANTA



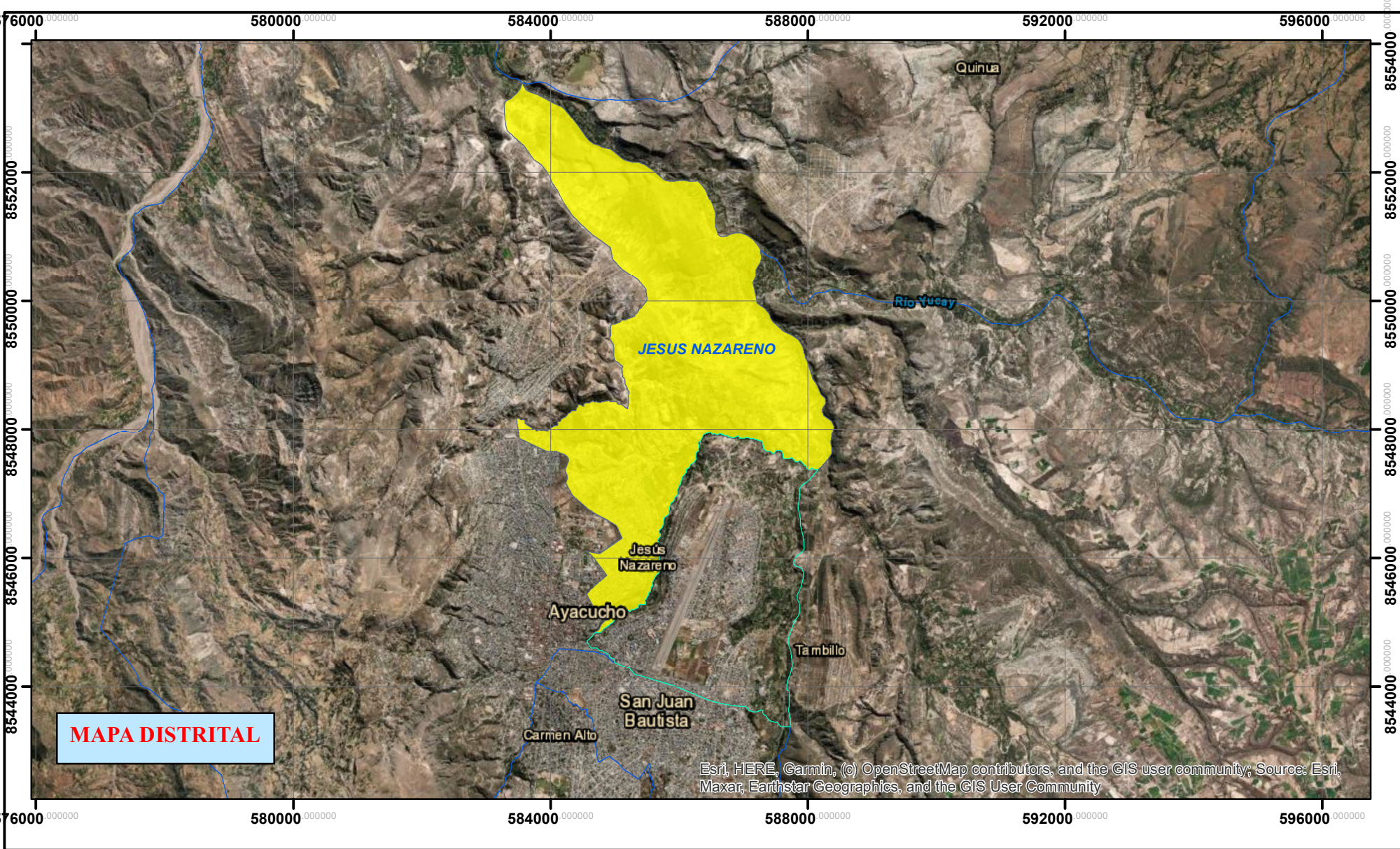
				TEMA: "Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho."	
UBICACION: TOTORILLA DISTRITO: NAZARENAS		PROVINCIA: HUAMANGA		DEPARTAMENTO: AYACUCHO	
DISEÑO: ROY ROGER ROBLES QUICANA		TESIS:		LÁMINA:	
PLANO: DISEÑO PLANTA Y PERFIL		SISTEMA DE GEOREFERENCIACION ZONA: 18 SUR		"Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho."	
DISEÑO: ROY ROBLES		SISTEMA DE GEOREFERENCIACION ZONA: 18 SUR		T-01	



Mapa departamental E: 1/13 350 000
DEP: AYACUCHO



Mapa provincial E: 1/3 400 000
PROV: HUAMANGA



DISTRITO: JESUS NAZARENO E: 1/250 000



"UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Proyecto:
"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA APLICANDO LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL RÍO ALAMEDA, DISTRITO DE JESÚS NAZARENO, AYACUCHO."

Plano:
MAPA:
TIPO DE SUELO
DEL PUNTO
DE INTERVENCIÓN

Ubicación
Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesus Nazarenos

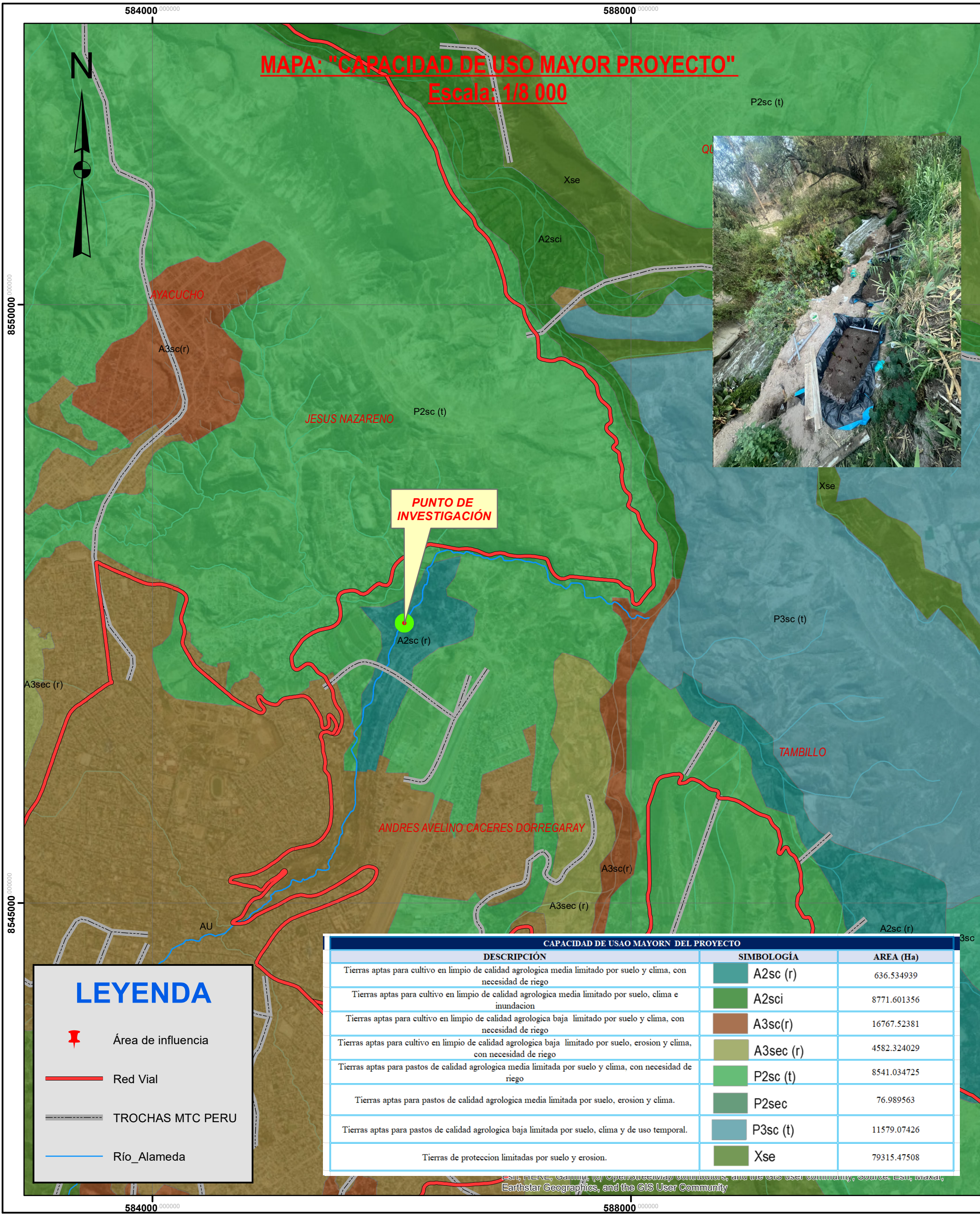
Asesor:
Ing. Norma GARCIA TUCA
Tesis:
Pre - Grado
Semestre:
2025-II

Estudiante:
Robles Quicaña Roy Roger
Diseño y dibujo:
Robles Quicaña Roy Roger
Fecha:
Noviembre 2025

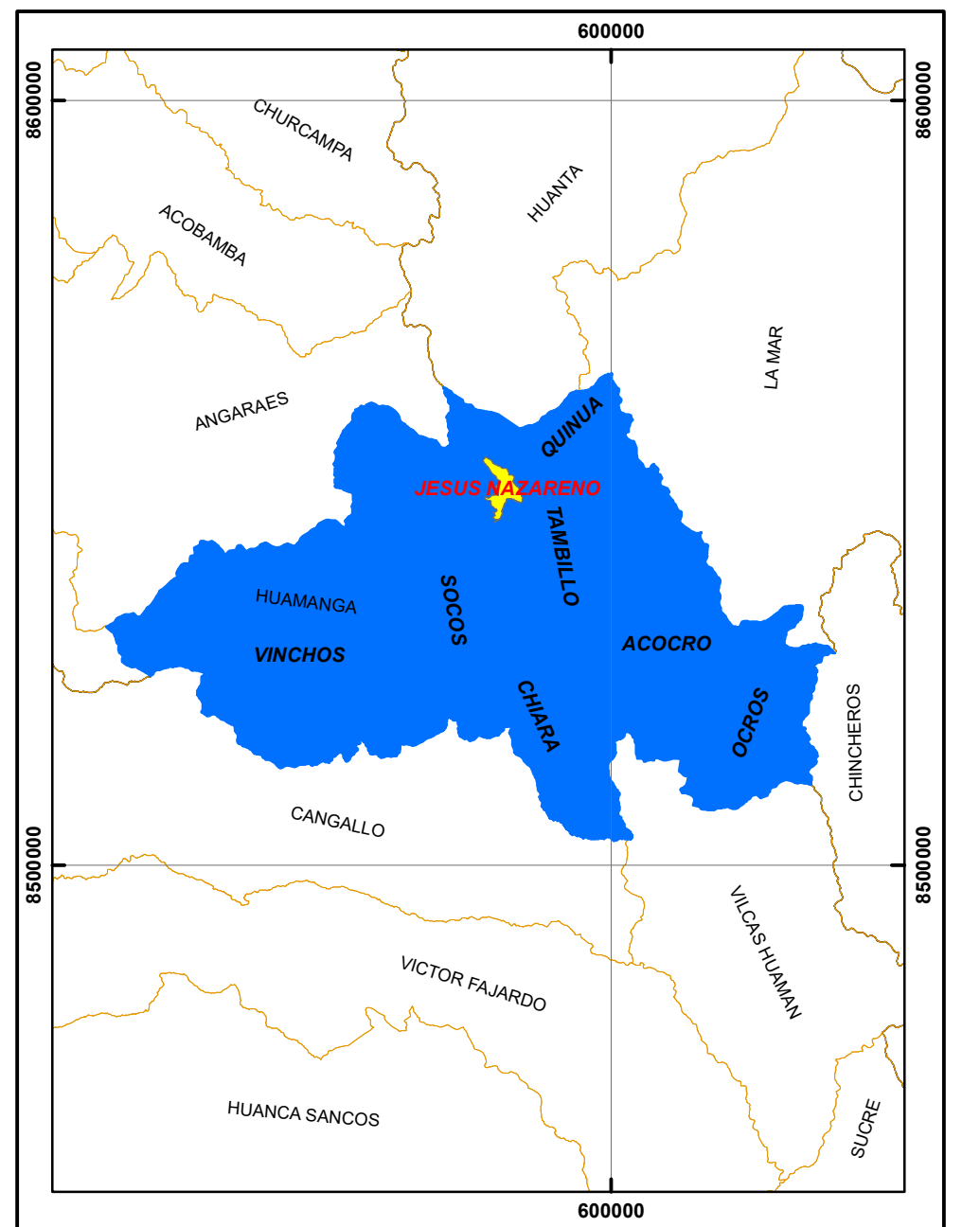
Coordenadas:
UTM
WGS - 84
Zona:
18 S

Escala:
Indicada

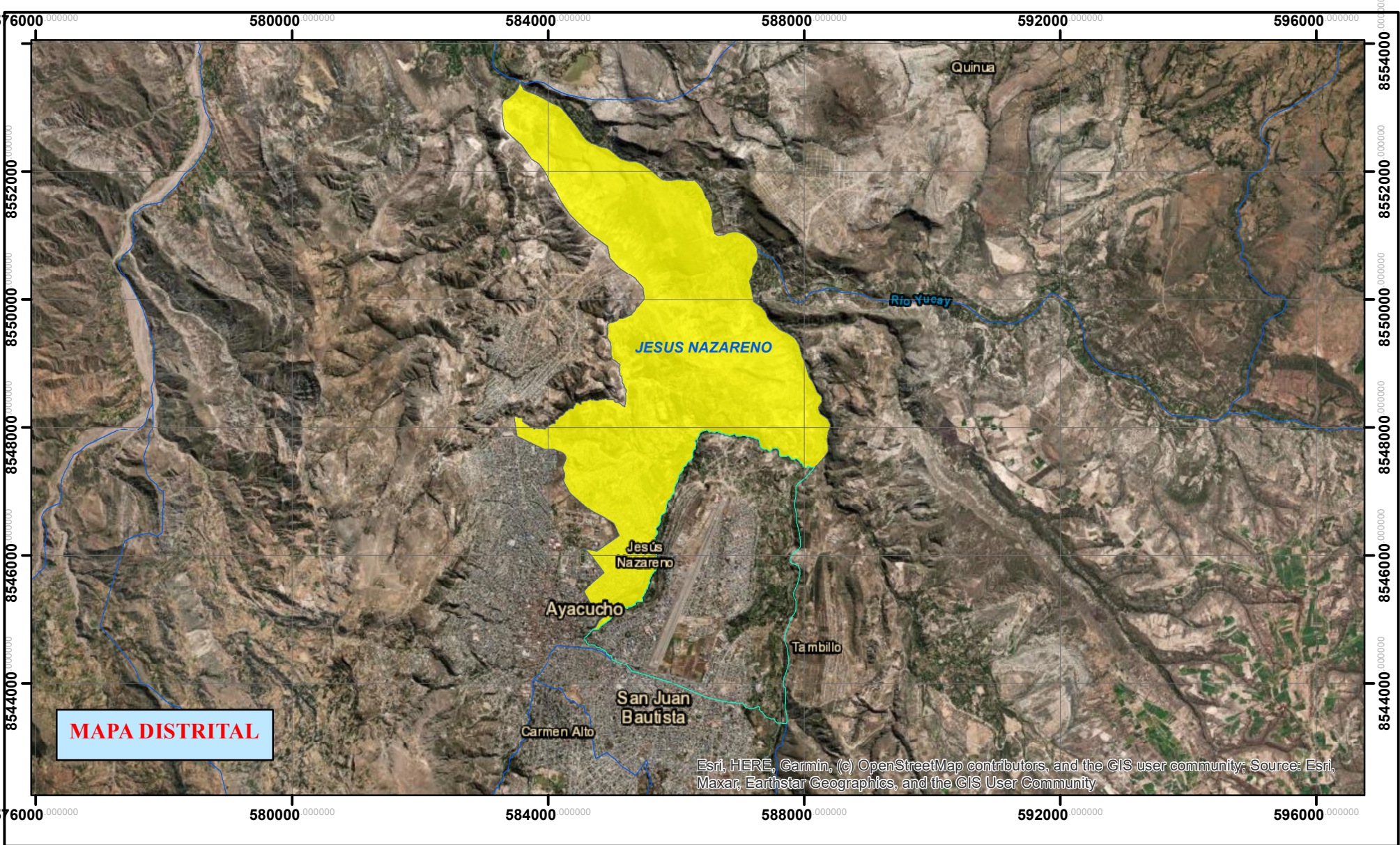
Lámina:
IA-01



Mapa departamental E: 1/13 350 000
DEP: AYACUCHO



Mapa provincial E: 1/3 400 000
PROV: HUAMANGA



DISTRITO: JESUS NAZARENO E: 1/250 000



"UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Proyecto:
"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA APLICANDO LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL RÍO ALAMEDA, DISTRITO DE JESÚS NAZARENO, AYACUCHO."

Plano:
MAPA:
CUM
DEL PUNTO
DE INTERVENCIÓN

Ubicación
Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesús Nazarenos

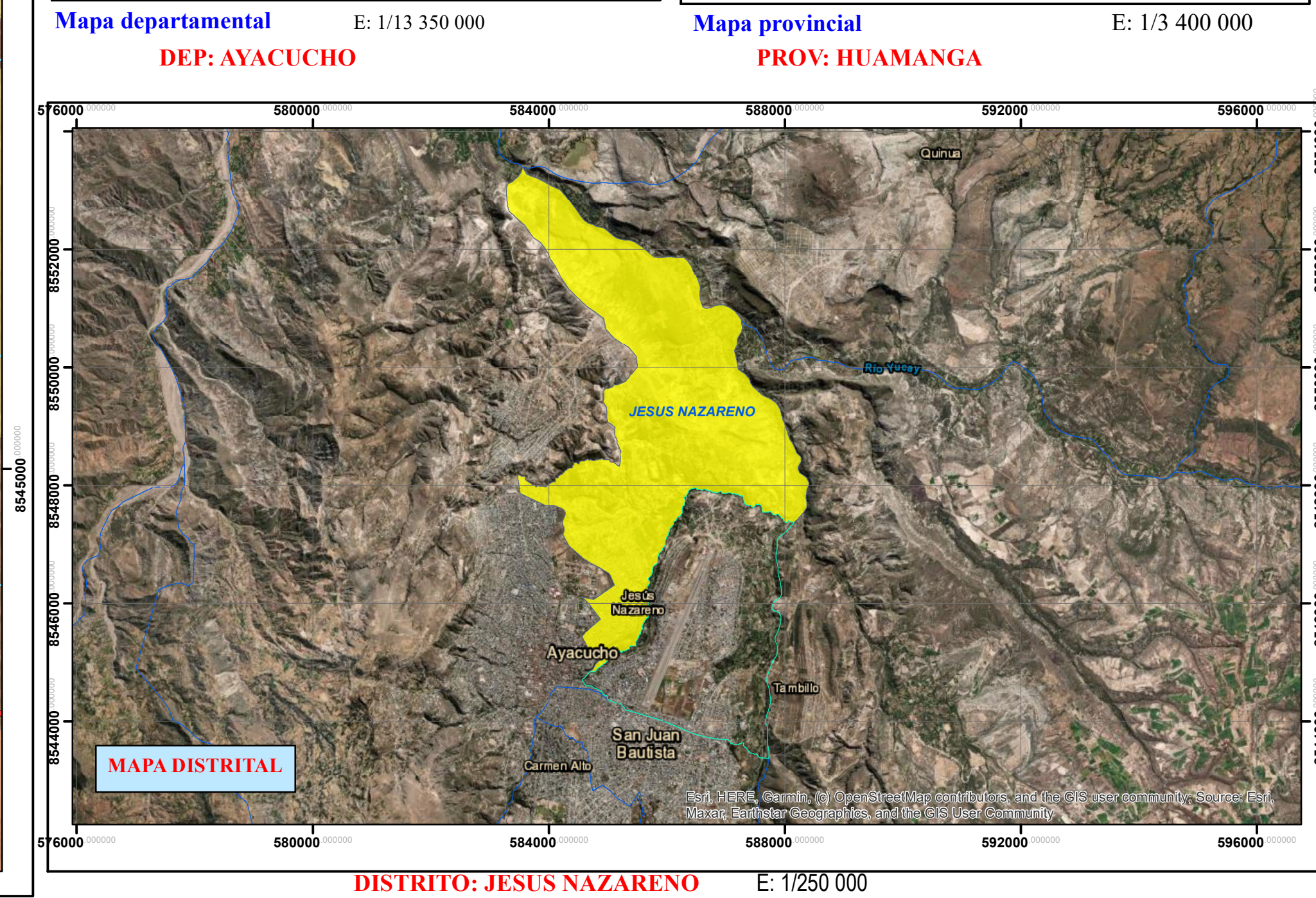
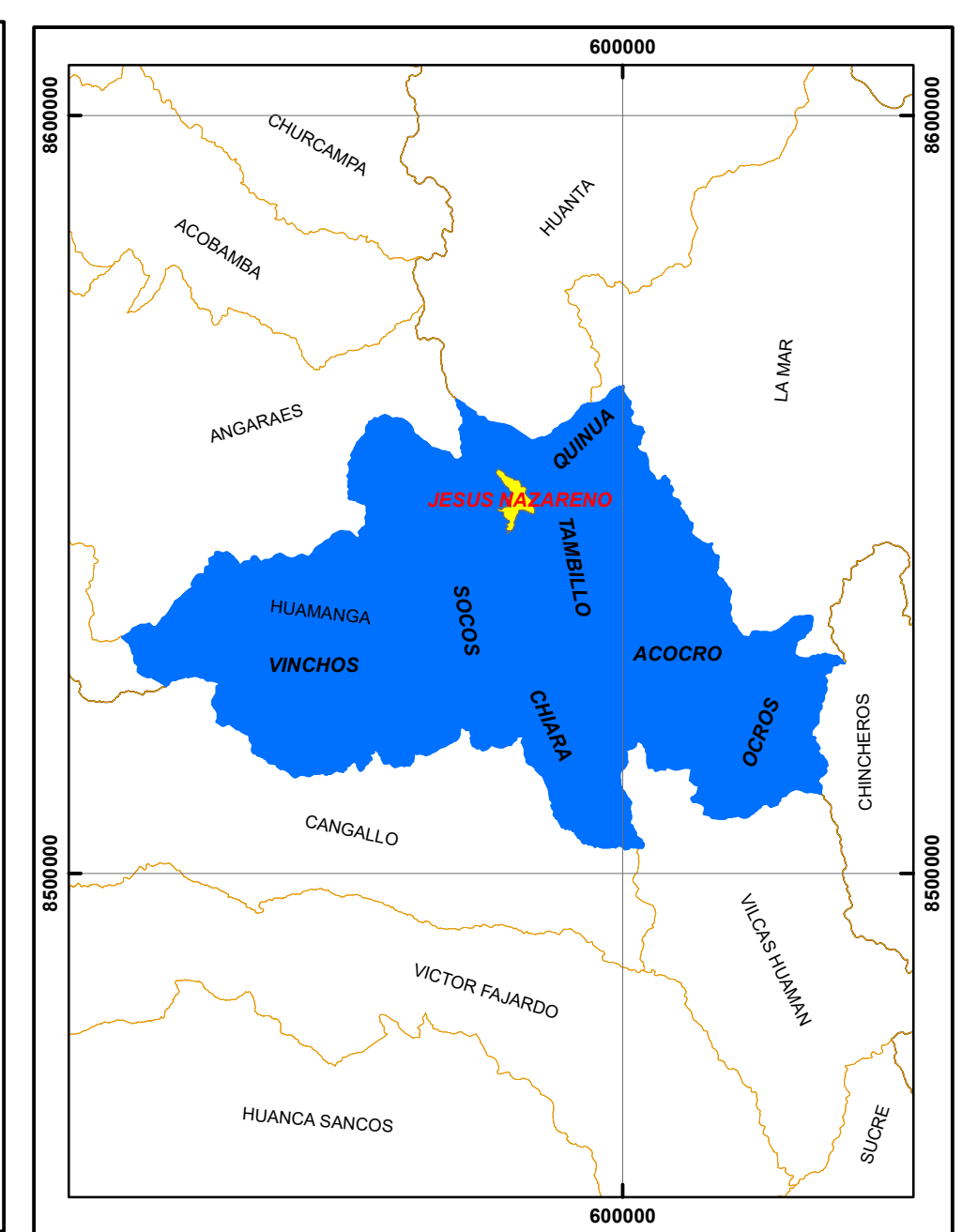
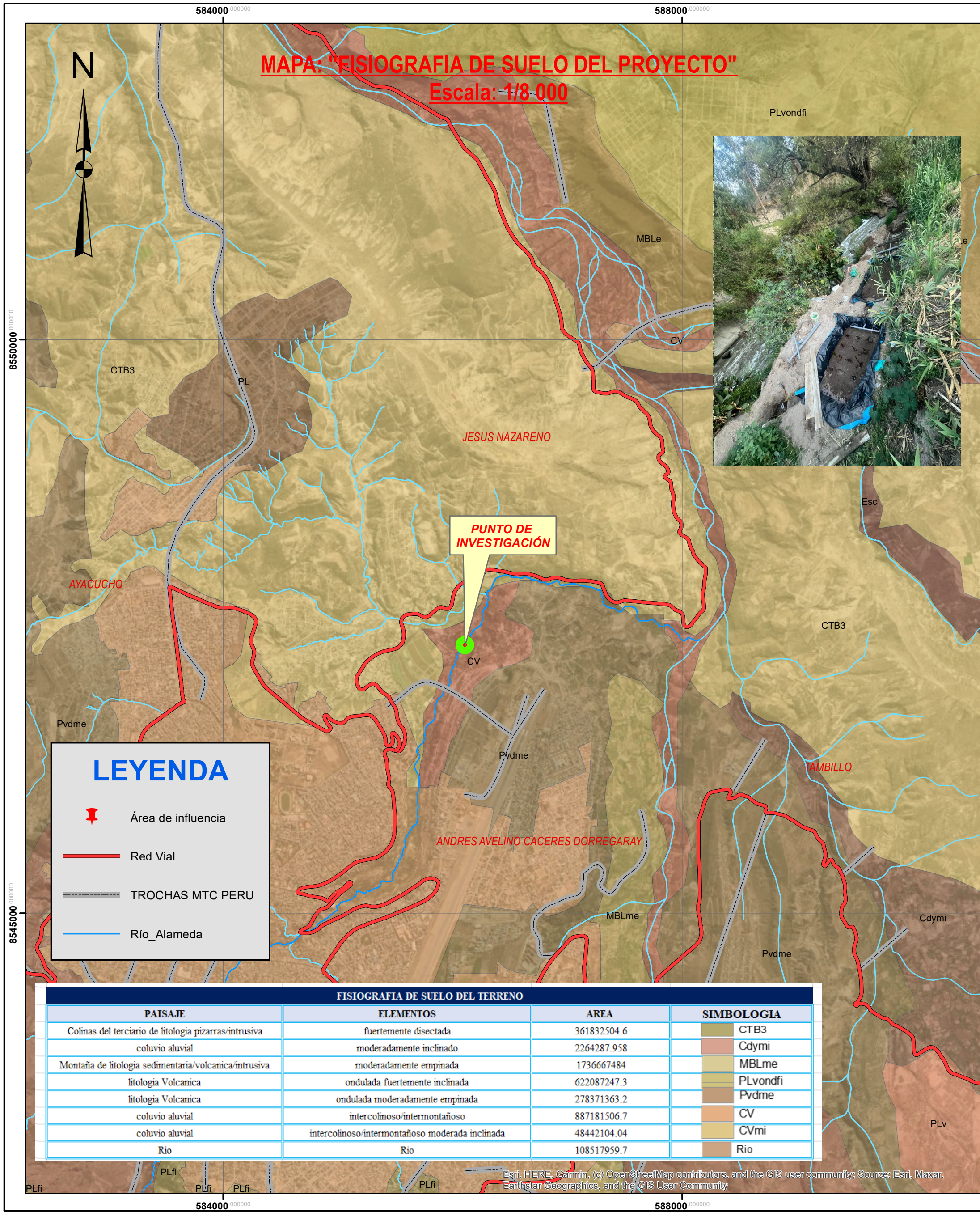
Asesor:
Ing. Norma GARCIA TUCA
Tesis:
Pre - Grado
Semestre:
2025-II

Estudiante:
Robles Quicaña Roy Roger
Diseño y dibujo:
Robles Quicaña Roy Roger
Fecha:
Noviembre 2025

Coordenadas:
UTM
WGS - 84
Zona:
18 S

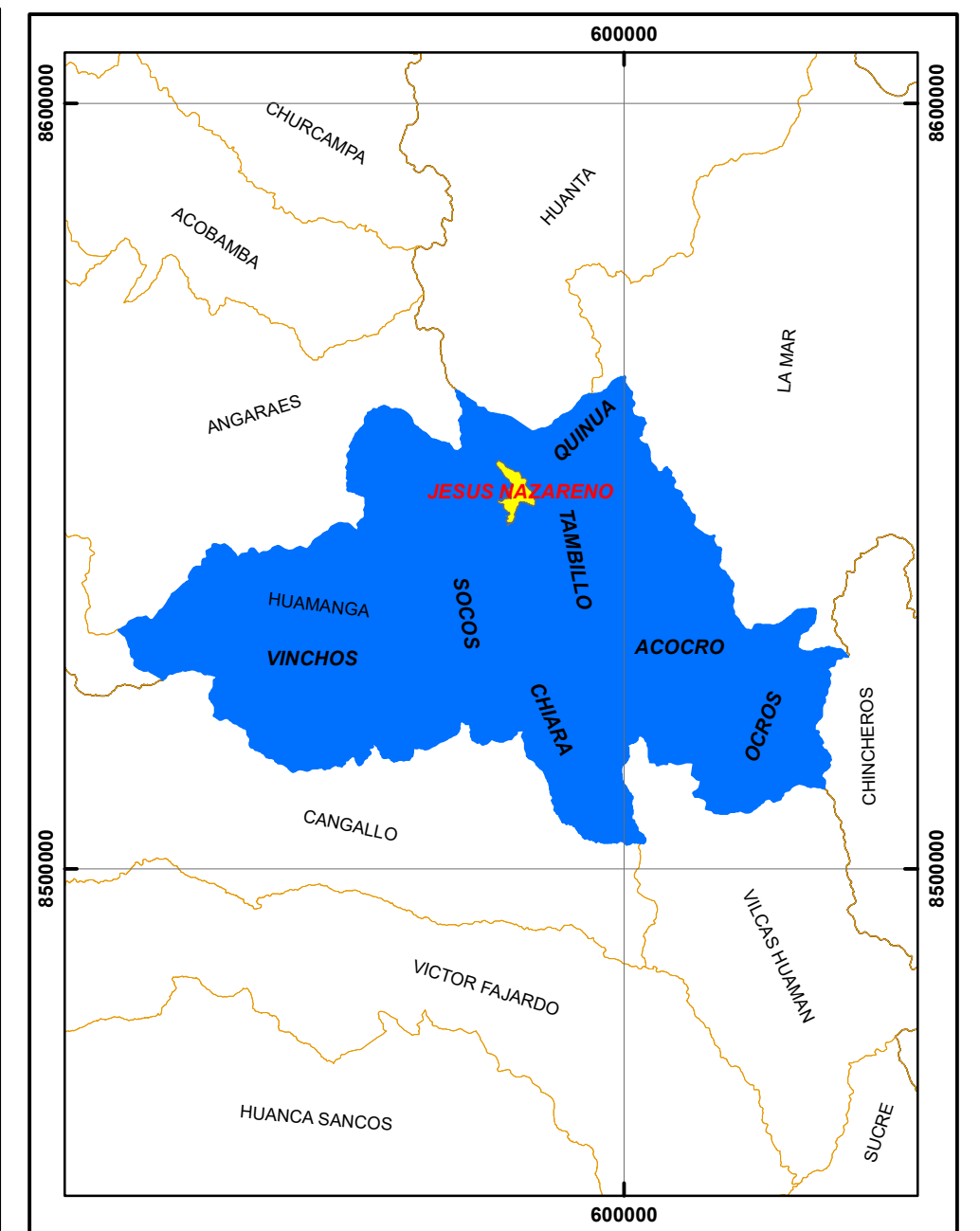
Escala:
Indicada

Lámina:
IA-01

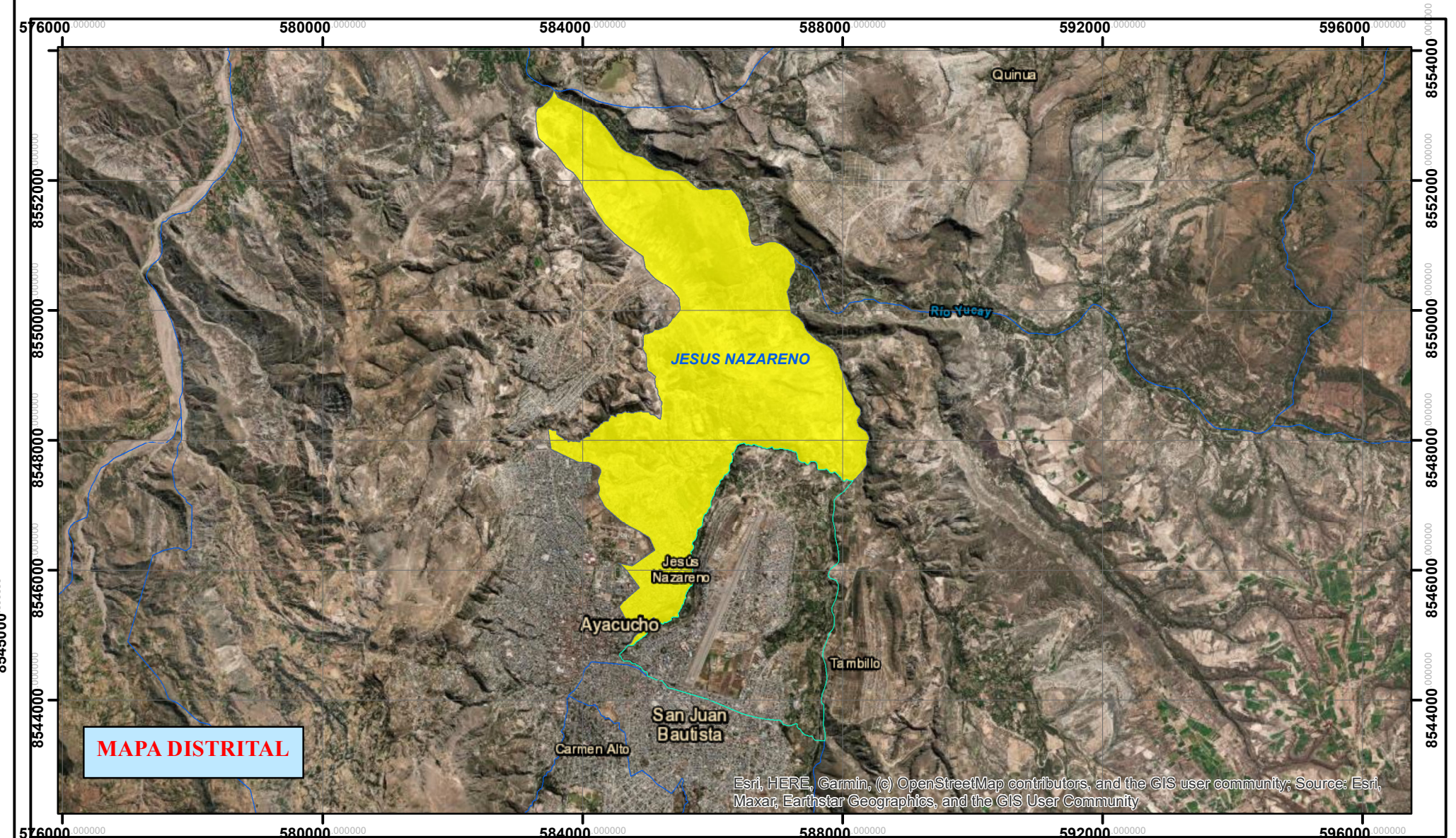




Mapa departamental E: 1/13 350 000
DEP: AYACUCHO



Mapa provincial E: 1/3 400 000
PROV: HUAMANGA



DISTRITO: JESUS NAZARENO E: 1/250 000



"UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Proyecto:
"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA APLICANDO LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL RÍO ALAMEDA, DISTRITO DE JESÚS NAZARENO, AYACUCHO."

Plano:
MAPA:
GEOMORFOLOGÍA DEL PUNTO DE INTERVENCIÓN

Ubicación
Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesús Nazarenos

Asesor:
Ing. Norma GARCIA TUCA
Tesis:
Pre - Grado
Semestre:
2025-II

Estudiante:
Robles Quicaña Roy Roger
Diseño y dibujo:
Robles Quicaña Roy Roger
Fecha:
Noviembre 2025

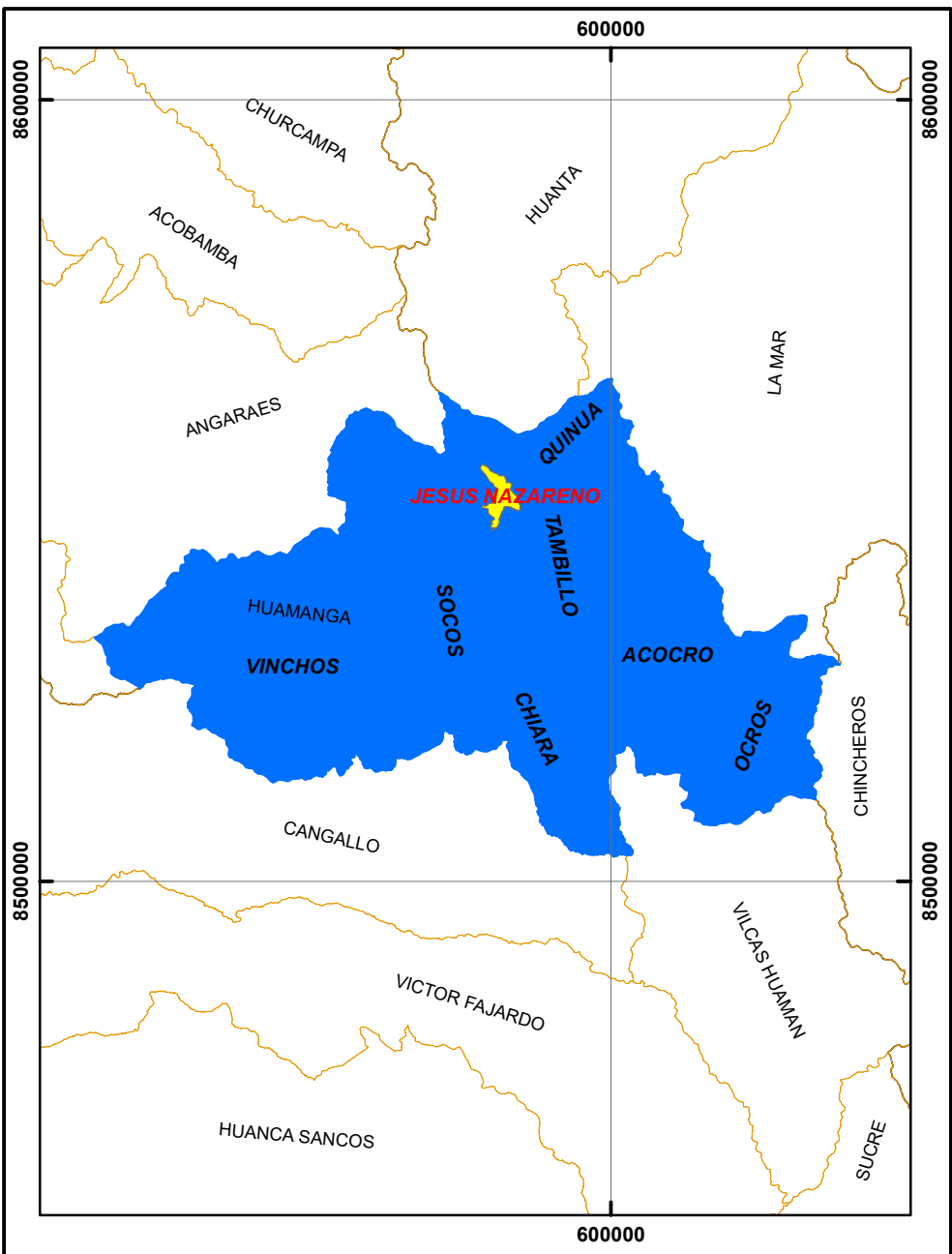
Coordenadas:
UTM
WGS - 84
Zona:
18 S

Escala:
Indicada

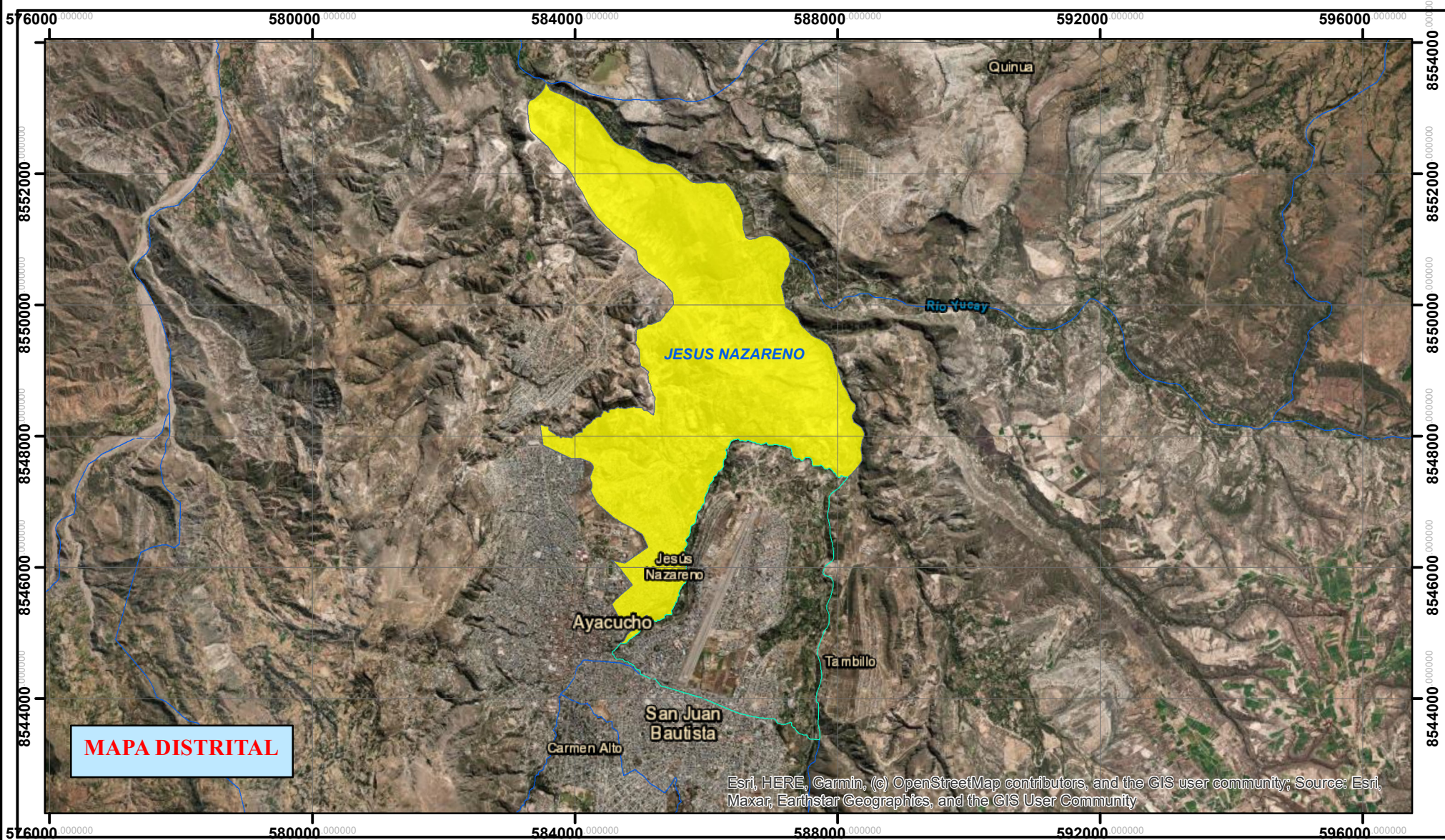
Lámina:
IA-01



Mapa departamental
DEP: AYACUCHO



Mapa provincial
PROV: HUAMANGA



DISTRITO: JESUS NAZARENO



"UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA"
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Proyecto:

"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA APLICANDO LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL RÍO ALAMEDA, DISTRITO DE JESÚS NAZARENO, AYACUCHO."

Plano:

MAPA:
USO ACTUAL
DE SUELO
DEL PUNTO
DE INTERVENCIÓN

Ubicación

Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesús Nazarenos

Asesor:

Ing. Norma GARCIA TUCA

Tesis:

Pre - Grado

Semestre:

2025-II

Estudiante:

Robles Quicaña Roy Roger

Diseño y dibujo:

Robles Quicaña Roy Roger

Fecha:

Noviembre 2025

Coordenadas:

UTM
WGS - 84

Zona:

18 S

Escala:

Indicada

Lámina:

IA-01

**UNSCH**FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. ROY ROGER ROBLES QUICANA
R.D. N° 315-2026-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho, a los quince días del mes de julio del año dos mil veintiséis, siendo las quince horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla, Ing. Norma García Tucta como asesora, Dr. Juan Charapaqui Anccasi y el M.Sc. David Jorge Alarcón Ataucusi; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola, presentado por el Bachiller **ROY ROGER ROBLES QUICANA**.

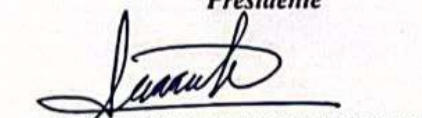
El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invitó a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	16	15	16	16
Ing. Norma García Tucta	15	13	16	15
Dr. Juan Charapaqui Anccasi	16	13	15	15
M.Sc. David Jorge Alarcón Ataucusi	15	13	13	14
PROMEDIO GENERAL				15

Observaciones: Por acuerdo unánime de los miembros del jurado, el título del trabajo de investigación debe ser: **Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho - 2025**

Acto seguido se invita a la sustentante y público en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.


Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Presidente


Dr. Juan Charapaqui Anccasi
Jurado


Ing. Norma García Tucta
Asesora


M.Sc. David Jorge Alarcón Ataucusi
Jurado


Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por **R.D N° 213-2025-UNSCH-FCA-CF**; hace constar que el trabajo titulado:

Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho – 2025

Autor : Roy Roger Robles Quicaña
Asesor : Norma García Tucta

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software **TURNITIN UNSCH**, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de tesis, aprobado mediante **RCU 039-2021-UNSCH-CU**, arrojando un resultado de **doce (12%)** de índice de similitud, con exclusión de citas y bibliografía, y de coincidencias menores de 30 palabras.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con identificador de la entrega: 3002726457

Ayacucho, 24 de Julio de 2026

Atentamente,



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Prof. Dr. Eleazar Chuchón Angulo
DNI 42662714

Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho - 2025

por Roy Roger Robles Quicaña

Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río Alameda,
Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	13%	9%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	Fuente de Internet	2%
2	repositorio.upsc.edu.pe	Fuente de Internet	1%
3	www.campustudionline.com	Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	1%
5	repositorio.escuelaing.edu.co	Fuente de Internet	1%
6	dspace.ups.edu.ec	Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unfv.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
8	es.scribd.com	Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.udh.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
10	Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca	Trabajo del estudiante	<1%
11	repositorio.upt.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.ucundinamarca.edu.co	Fuente de Internet	<1%
13	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	Trabajo del estudiante	<1%
14	repositorio.unjfsc.edu.pe	Fuente de Internet	<1%
15	vsip.info	Fuente de Internet	<1%

16	ribuni.uni.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
17	Carlos M. López Vázquez, Germán Buitrón Méndez, Héctor A. García, Francisco J. Cervantes Carrillo. "Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño", Water Intelligence Online, 2017 Publicación	<1 %
18	Submitted to Universidad Rafael Landívar Trabajo del estudiante	<1 %
19	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
20	Submitted to unsaac Trabajo del estudiante	<1 %
21	repositorio.unajma.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	repositorio.uvg.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
23	CESEL S A. "Primera MEIA de la Unidad Minera Casapalca-IGA0000614", R.D. N° 188 -2019-SENACE-PE/DEAR, 2020 Publicación	<1 %
24	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
25	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1 %
27	INSIDEO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - INSIDEO S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Línea de Transmisión Eléctrica 220 kV Montalvo - Los Héroes y Subestaciones Asociadas-IGA0006865", R.D. N° 565-2017-MEM/DGAAE, 2020 Publicación	<1 %
28	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC Trabajo del estudiante	<1 %
30	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

31

Fuente de Internet

<1 %

32

DQ ASESORIA & CONSULTORIA E.I.R.L.. "Modificación y Actualización del Plan de Cierre de la Cantera Antigua, Cantera Ayacucho y Cantera Acumulación Puno-IGA0020941", R.D. N° 00029-2022-PRODUCE/DGAAMI, 2022

Publicación

<1 %

33

riunet.upv.es

Fuente de Internet

<1 %

34

[Submitted to Universidad Nacional de Jaen](#)

Trabajo del estudiante

<1 %

35

docplayer.es

Fuente de Internet

<1 %

36

repositorio.ufpso.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

37

repository.udca.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo

**Evaluación de la calidad de agua aplicando los humedales artificiales en el río
Alameda, Distrito de Jesús Nazareno, Ayacucho – 2025**

**Evaluation of Water Quality Using Constructed Wetlands in the Alameda River,
Jesús Nazareno District, Ayacucho – 2025**

Roy Roger Robles Quicaña¹

roy.robles.21@unsch.edu.pe

Norma García Tucta²

norma.garcia@unsch.edu.pe

RESUMEN

La investigación evaluó la calidad del agua del río Alameda mediante humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en Totorá, distrito de Jesús Nazareno (Ayacucho). Se aplicó un enfoque cuantitativo, descriptivo y cuasiexperimental, comparando la calidad del agua antes y después del tratamiento mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

Los resultados evidenciaron una reducción de la DQO (191 a 126.7 mg/L) y de los sólidos suspendidos totales (986 a 31.23 mg/L). Sin embargo, la DBO₅ no disminuyó (60.66 a 63.75 mg/L), mientras que los nutrientes y coliformes fecales permanecieron en niveles elevados.

Se concluye que el humedal mejoró parcialmente la calidad del agua, principalmente por la remoción de sólidos suspendidos y la reducción de la DQO. La ausencia de disminución de la DBO₅ se asocia al incremento de la carga orgánica ocasionado por las precipitaciones durante el periodo de evaluación.

Palabras claves: calidad del agua, humedales artificiales, parámetros fisicoquímicos, DQO, DBO₅.

¹ Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Abstract

This study evaluated the water quality of the Alameda River using horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna tuerckheimii* and *Phragmites australis* in Totorá, Jesús Nazareno District, Ayacucho, Peru. A quantitative, descriptive, and quasi-experimental approach was applied by comparing water quality before and after treatment through physicochemical and microbiological analyses.

The results showed a reduction in Chemical Oxygen Demand (COD) from 191 to 126.7 mg/L and Total Suspended Solids (TSS) from 986 to 31.23 mg/L. However, Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) did not decrease, changing from 60.66 to 63.75 mg/L, while nutrient concentrations and fecal coliforms remained at high levels.

It was concluded that the constructed wetland partially improved water quality, mainly through the removal of suspended solids and the reduction of COD. The lack of BOD₅ reduction was attributed to the increased organic load caused by rainfall during the evaluation period.

Keywords: water quality, constructed wetlands, physicochemical parameters, COD, BOD₅.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales ha constituido un problema ambiental relevante, asociado al vertimiento de aguas residuales domésticas sin tratamiento adecuado, lo cual ha generado alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del recurso hídrico. Esta situación ha ocasionado impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y ha limitado los usos del agua en diversos ámbitos.

En el distrito de Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, región Ayacucho, el río Alameda ha sido receptor de descargas de aguas residuales, lo que ha contribuido a la disminución de la calidad del agua y a la presencia de contaminantes orgánicos, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos. Dichas condiciones han representado un riesgo potencial para el entorno ambiental y la población cercana.

Ante esta problemática, los humedales artificiales han sido considerados como una alternativa de tratamiento sostenible, debido a su capacidad para remover contaminantes mediante procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan en el sustrato y la vegetación. Los humedales es una opción para el tratamiento de aguas residuales y constituyen una posibilidad de hábitat para especies locales y migratorias dadas las amenazas. (Montes Iturrizaga , 2023)

Estos sistemas han demostrado ser altamente eficientes en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos y los coliformes fecales, lo que evidencia su capacidad para

mejorar significativamente la calidad del agua. La disminución de estos parámetros refleja la eliminación tanto de materia orgánica biodegradable como de compuestos contaminantes, así como la reducción de microorganismos patógenos.(Nava Rojas & Lango Reynoso, 2023)

En ese contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua del río Alameda mediante la aplicación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, utilizando las especies *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, con la finalidad de analizar la variación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después del tratamiento.

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Para su desarrollo del presente estudio se utilizaron materiales e instrumentos necesarios tanto para construcción del humedal, la toma de muestras de agua y el registro de datos durante las diferentes etapas de la investigación.

2.1.1. Materiales y equipos en campo

2.1.1.1. Materiales para los Humedales

- Piedra chancada
- Arena gruesa
- Arena fina
- Plástico (Reemplazo de la geomembrana)
- Tubería PVC de ½", 2" y 4"
- Accesorios (Codos, Uniones y Tees)
- Alambre N° 1.
- Nivel de mano
- Estacas
- Yeso
- Malla
- Flexo
- Cemento Tipo I
- Agua
- Balde de 20 L

2.1.1.2. Materiales para el muestreo para la calidad de agua

- Caja Tecnopor mediana
- Frasco de plástico natural 1000 ml
- Frasco de plástico natural 120 ml
- Frasco de plástico natural 500 ml
- Cadena de custodia de aguas y suelos
- Frasco de vidrio SCHOTT 250 ml
- Frasco vidrio WINKLER 300ml

- Guantes de látex
- Ácido sulfúrico

2.1.2. Materiales y equipos en oficina

- Laptop
- Papel Bond A4, A3 y A2
- Impresora
- Lapiceros
- Cuaderno de notas

2.1.3. Programas de Ingeniería

- AutoCAD Civil 3D 2024
- ArcGIS 10.8.0
- ArcGis Pro
- Google Earth Pro
- Microsoft Office

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1. Reconocimiento del área de estudio

El reconocimiento del área se realizó en el río Alameda, ubicado en el Distrito de Jesús Nazareno, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho. Esta etapa permitió identificar las características físicas y ambientales del lugar donde se implementaron los humedales artificiales.

Figura 1.

Imagen satelital del punto de investigación



Nota. El trazo en color azul representa la vía de acceso, en tanto que el punto rojo señala la ubicación del área de intervención.

2.2.2. Análisis del punto de intervención

2.2.2.1. Selección del punto de intervención

La selección del lugar de intervención se realizó mediante una inspección directa en el río Alameda, localizando un área que reúne las condiciones apropiadas para la instalación y el funcionamiento de un humedal artificial. La zona seleccionada se localizó en un tramo donde el cauce presentó una pendiente suave y un flujo de agua relativamente constante.

Finalmente, el lugar seleccionado proporcionó un terreno estable, accesibilidad para el transporte de materiales y condiciones apropiadas para realizar el control y seguimiento del sistema durante todo el periodo de evaluación.

2.2.2.2. Riesgos y condiciones del punto de intervención

Durante la inspección de campo se identificaron diversos aspectos relevantes que influyeron en la planificación y diseño del sistema de tratamiento propuesto.

Figura 2.

Condiciones ambientales del punto de intervención



Nota. Fotografía tomada aguas arriba del punto de investigación.

- **Condiciones del punto de intervención**

- Estabilidad del terreno: Se observaron procesos activos de deslizamiento y socavación lateral directa.

- Régimen de caudal observable: Captación controlada del flujo contaminado hacia el humedal.
- Calidad del agua inicial: Se observaron olores, turbidez elevada y presencia de sólidos suspendidos, condiciones adecuadas para evaluar la eficiencia del humedal.

- **Riesgos identificados**

- Crecidas estacionales
- Erosión en la ribera
- Sedimentación
- Vandalismo o intervención humana
- Descargas adicionales no controladas

2.2.3. Criterio de diseño

El predimensionamiento del humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial se realizó considerando los criterios técnicos establecidos en la Norma Técnica OS.090 "Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), complementados con los criterios de diseño propuestos por Kadlec y Wallace (2009), Vymazal (2010) y Crites y Tchobanoglous (2000), debido a que la Norma OS.090 establece criterios generales para plantas de tratamiento, mientras que el dimensionamiento específico de humedales artificiales se desarrolla mediante metodologías internacionalmente aceptadas.

Tabla 1.

Carga superficial para humedales de flujo superficial y subsuperficial

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)		Meta de tratamiento del efluente (mg/L)		Carga superficial contaminante (kg/Ha-día)	
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
DBO	5 a 100	30 a 175	5 a 30	10 a 30	10 - 100	67 - 157
SST	5 a 100	30 a 150	5 a 30	10 a 30	10 - 112	45 - 168
NH ₃ /NH ₄	2 a 20	30 a 150	1 a 10	10 a 30	1 - 4,5	45 - 168
NO ₃	2 a 10	2 a 10	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 13,5
Nitrógeno total	2 a 20	2 a 40	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 12,3
Fósforo total	1 a 10	1 a 10	0,5 a 3	0,5 a 3	1 - 4,5	1 - 4,5

Fuente: Adaptado de EPA, 2000a y Rabat Blázquez, 2016, p. 36

Posteriormente, las metodologías aplicadas al dimensionamiento de humedales artificiales incorporaron ecuaciones fundamentadas en la biocinética de los procesos de remoción que tienen lugar dentro de estas estructuras. Dichas expresiones incluyeron parámetros específicos de cálculo para cada tipo de humedal artificial, considerando factores como la profundidad, la porosidad, la profundidad de las raíces y la temperatura, entre otros.

2.2.3.1. Metodología de Reed

La metodología propuesta por Reed se basa en determinar el área requerida para reducir la concentración inicial de un contaminante hasta alcanzar una concentración objetivo, de acuerdo con las exigencias establecidas para el vertido final. Para ello, se estima el área necesaria destinada a la remoción de contaminantes como la DBO, nitrógeno total, fósforo y sólidos totales.

$$As = \frac{Ln \frac{Co}{Ce} * Q}{Kt * d * n}$$

Donde:

As: Área superficial del humedal (m²)

Ln: Logaritmo natural de la relación entre concentración afluente y efluente (adimensional)

Co: Concentración del contaminante del afluente (mg/L)

Ce: Concentración del contaminante del efluente (mg/L)

Q: Caudal de diseño (m³/día)

Kt: Constante a la temperatura del agua residual (días⁻¹)

d: Profundidad del humedal (m)

n: Porosidad del medio (adimensional)

- Kt corresponde a una constante de reacción de primer orden que depende de la temperatura, expresada en unidades de día⁻¹ (d⁻¹), y puede determinarse mediante la siguiente expresión.

$$Kt = K(20) * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

-Kt : Constante de remoción

- K₂₀: Constante del agua a 20 °C

- θ = 1.057 coeficiente empírico

-T : Temperatura del agua residual (°C)

- T representa la temperatura promedio del agua durante la operación del sistema (°C), θ corresponde al coeficiente de temperatura referido a 20 °C y K₂₀ es la constante determinada para una temperatura de 20 °C, expresada en unidades de día⁻¹ (d⁻¹). Los valores característicos asociados a estas constantes representan parámetros de diseño utilizados en la formulación y

ajuste de los modelos cinéticos aplicados al humedal artificial de diferentes autores.

La constante cinética representa la velocidad de remoción de la materia orgánica en el humedal artificial. Su valor depende de la temperatura del agua, por lo que fue corregida mediante el factor de temperatura propuesto por Kadlec y Wallace (2009), considerando las condiciones ambientales del área de estudio.

Tabla 2.

Coefficiente de velocidad de reacción de la DBO

Criterio	Descripción	Coefficiente
Estándar laboratorio	Ensayos convencionales de DBO de laboratorio.	El rango de valores de k_{20} para efluentes de procesos de tratamiento biológico es de 0.12 a 0.23 d^{-1}

Fuente: Elaboración propia en base a APHA (1999), Metcalf & Eddy (2014), Phelps (1944).

En la tabla 2, se menciona al coeficiente de velocidad de reacción de la DBO. El rango de valores de k_{20} para efluentes de procesos de tratamiento biológico es de 0.12 a 0.23 d^{-1} . Para un agua residual determinada, el valor de k_{20} a 20°C puede determinarse experimentalmente observando la variación en el tiempo del oxígeno disuelto en una serie de muestras incubadas. (Metcalf & Eddy, 2014)

Se ha determinado que el coeficiente de temperatura presenta valores de aproximadamente 1.057 para temperaturas entre 20 y 30°C, mientras que en el rango de 4 a 20°C puede alcanzar 0.23. Aunque en muchos estudios se utiliza el valor 1.047, se ha comprobado que este no representa adecuadamente el

comportamiento a bajas temperaturas, especialmente por debajo de 20°C (Metcalf & Eddy, 2014)

La tabla 3 se recopiló el dato para el parámetro θ que representa la variación de la velocidad de reacción frente a cambios térmicos y permite corregir la constante cinética de remoción respecto a la temperatura estándar de 20 °C. Su uso contribuye a obtener estimaciones más representativas del comportamiento real del sistema bajo condiciones de operación específicas. (Kadlec & Wallace, 2009)

Tabla 3.

Parámetro de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial

Parámetro	KA20 (m/año)	θ	Concentración de fondo, C, mg/L
DBO	117	1.057	3
SST	43.4	1	6
Nitrógeno orgánico	35	1.05	1.5
Nitrógeno amoniacal	34	1.05	0
Nitrógeno NO _x	50	1.05	0
Nitrógeno total	10	1.05	1.5
Fosforo total	9.1	1.09	0
Coliformes totales	100	1.003	200 UFC/100 MI

Fuente. Tomado de *Treatment Wetlands* (2.^a ed.), por R. H. Kadlec y S. D. Wallace, 2009.

2.2.3.2. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Tiempo necesario para que el agua permanezca dentro del sistema. Un TRH adecuado favorece la sedimentación, degradación biológica y filtración. Se muestra en la formula siguiente, definido considerando el caudal de ingreso y el volumen útil del humedal. Los cálculos realizados se muestran en los anexos.

$$TRH = \frac{\ln \frac{Co}{Ce}}{Kt}$$

Donde:

- Co: Concentración del contaminante del afluente (mg/L)
- Ce: Concentración del contaminante del efluente (mg/L)
- Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días⁻¹)

En los humedales artificiales, el tiempo de retención hidráulico puede variar según el tipo de sistema. En los humedales de flujo subsuperficial generalmente se encuentra en un rango de 3 a 14 días.

2.2.3.3. Carga contaminante de entrada

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) fue considerada como el principal parámetro de diseño del humedal artificial, debido a que la concentración establecida para el efluente se encuentra definida en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobados mediante Decreto Supremo. La selección de este parámetro se fundamenta en su importancia como indicador de la carga orgánica biodegradable y en su influencia directa sobre los criterios de diseño del sistema.

En la tabla 4, el valor límite adoptado para el efluente permitió establecer la meta de calidad del agua tratada y orientar el dimensionamiento del humedal, influyendo en la determinación de variables como la constante cinética de remoción, el tiempo de retención hidráulico y el área superficial requerida. De esta manera, el diseño fue desarrollado considerando el cumplimiento

de las disposiciones normativas vigentes y las condiciones necesarias para garantizar la calidad esperada del efluente tratado.

Tabla 4.

Parámetro de riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Agua para riego restringido	D2: Bebida de animales
FÍSICOS - QUÍMICOS			
Aceites y Grasas	mg/L	5	10
Bicarbonatos	mg/L	518	**
Cianuro Wad	mg/L	0,1	0,1
Cloruros	mg/L	500	**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)
Conductividad	µS/cm	2 500	5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15	15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40	40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2	0,5
Fenoles	mg/L	0,002	0,01
Fluoruros	mg/L	1	**
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N) + Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	100	100
Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	10	10

Fuente. Adaptado de Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017.

2.2.3.4. Vegetación

El criterio empleado para la selección y evaluación de la vegetación se basó en la metodología propuesta en el markeo de plantaciones por Carbo Gomez & Vidal Marco, (1978), utilizando las formulaciones planteadas por dicho autor como referencia para estimar la influencia y el desempeño de las especies vegetales dentro del humedal artificial, ecuación.

$$NP = \frac{S}{A * 0.866}$$

Donde:

- NP : Número de plantas
- S : Superficie a sembrar
- A : Área ocupada por la planta

2.2.4. Diseño hidráulico

2.2.4.1. Determinación del caudal de diseño

Para el dimensionamiento del sistema, se determinó el caudal de ingreso mediante el método volumétrico, utilizando un balde de volumen conocido y un cronómetro, técnica empleada comúnmente en evaluaciones hidráulicas de campo por su simplicidad y confiabilidad. El procedimiento consistió en captar el flujo directamente en el balde y registrar el tiempo necesario para llenarlo completamente. Usando la ecuación.

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

Donde:

Q: Caudal volumétrico de ingreso (m^3/s)

V: Volumen del balde o recipiente utilizado en el aforamiento (m^3)

T: Tiempo necesario para llenar el recipiente completamente (s)

Figura 3.

Aforamiento de caudal para el pre dimensionamiento



Nota. Se optó por este método por el tema de su fácil cálculo, realizado con todas las precauciones del caso del río contaminado en extremo.

Seguidamente, se establecieron los parámetros de diseño, tales como el tiempo de retención hidráulica, la profundidad del lecho filtrante y la carga hidráulica aplicada. Estos criterios permitieron asegurar un adecuado funcionamiento del sistema durante la investigación.

2.2.4.2. Diseño del humedal

Se realizó la toma de muestras para obtener las concentraciones iniciales de DBO₅, DQO, SST y coliformes termo tolerantes presentes en el agua captada.

Seguidamente, se determinaron las dimensiones del sistema (largo, ancho y profundidad) en función del caudal definido y los parámetros establecidos, garantizando un flujo uniforme y condiciones apropiadas para el tratamiento.

- **Corrección de la Constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})**

Se realiza la corrección de la constante con la temperatura, la constante de velocidad de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) fue determinada a partir de los valores experimentales de DBO₅ obtenidos mediante la temperatura a 20 °C.

En la tabla 2 nos indica el constante coeficiente de velocidad de reacción de la DBO, según la literatura mencionada las aguas residuales con tratamientos previos en concentraciones bajas, teniendo en cuenta que se tuvieron remociones previas se opta por usar dicho dato de 0.230. Asimismo, es adoptada como referencia para el cálculo de K(20).

A partir de estos datos, se estimó la constante k a condiciones estándar y posteriormente se realizó su corrección en función de la temperatura del sistema, considerando un coeficiente de temperatura (θ) del ambiente donde se interviene la investigación.

Figura 4.

Toma de muestra de temperatura del agua.



Nota. Medición de la temperatura de una muestra de agua mediante un termómetro digital portátil durante trabajo de campo.

En primer lugar, se tomó como dato base la constante cinética a condiciones estándar, es decir, $K_{20} = 0.23 \text{ día}^{-1}$ a 20 °C . Luego, se consideró la temperatura del agua del sistema como se muestra en la figura 4, la cual fue de 19.80 °C . A partir de estos valores, se aplicó el factor de corrección por temperatura, utilizando un coeficiente θ típico para aguas residuales domésticas. El cálculo se realizó mediante la siguiente relación:

$$Kt = K(20) * \theta^{(T-20)}$$

Donde:

- Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})

- Kt : Constante a la temperatura del agua residual (días^{-1})
- K_{20} : Constante del agua a 20 °C
- $\theta = 1.06$ coeficiente empírico (Tabla 5)
- T : Temperatura del agua residual (°C)

Para el cálculo de la constante cinética ajustada por temperatura correspondiente a la DBO, se adoptó un valor de θ igual a 1.057, de acuerdo con los valores de referencia reportados para humedales artificiales de flujo subsuperficial en la tabla 1. La selección de este coeficiente se fundamenta en que la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno depende principalmente de procesos microbiológicos sensibles a la temperatura.

Finalmente, se obtuvo un valor de $K_t = 0.227 \text{ día}^{-1}$, lo cual indica un incremento en la velocidad de degradación de la materia orgánica debido al efecto de la temperatura, reflejando condiciones más favorables para la actividad biológica dentro del humedal artificial.

• **Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)**

Para el cálculo del TRH se empleó la metodología basada en los cálculos mencionados anteriormente sobre la cinética de remoción de primer orden utilizada en humedales artificiales, la cual considera la concentración del contaminante de entrada y salida, así como la constante cinética corregida por temperatura. A partir de la constante de reacción corregida (K_t).

El valor obtenido para el diseño fue de 6.15 días, indicando que el agua residual debe permanecer aproximadamente ese periodo dentro del

humedal para lograr la reducción esperada de DBO. Con esta metodología se obtiene el tiempo real de permanencia del flujo dentro del sistema, parámetro utilizado para verificar la capacidad hidráulica y la eficiencia del humedal diseñado.

- **Área superficial del humedal (m²)**

La superficie requerida para la remoción de contaminantes se determinó en función del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), distribuyéndose entre el humedal superficial y el subsuperficial. Para el diseño se adoptó una profundidad de 0.60 m, adecuada para el flujo subsuperficial y el desarrollo de la vegetación. El área se calculó mediante la ecuación de diseño para humedales artificiales, considerando el caudal, las concentraciones de entrada y salida, la constante cinética y las propiedades del medio filtrante.

$$As = \frac{Ln \frac{Co}{Ce} * Q}{Kt * d * n}$$

La porosidad experimental de 0.436 permitió estimar con mayor precisión el volumen efectivo y el TRH. Como resultado, se obtuvo un área superficial de 23.686 m², utilizada para definir las dimensiones finales del humedal.

- **Dimensiones geométricas del humedal**

Para el diseño del humedal artificial se establecieron criterios hidráulicos que garantizaran un funcionamiento eficiente del sistema. Se consideró una pendiente del fondo de 0.5 % a 1 % para favorecer el flujo por gravedad y evitar estancamientos, así como diferencias mínimas de nivel

entre la entrada y la salida para mantener la circulación continua del agua sin necesidad de bombeo. Asimismo, el diseño se orientó a optimizar la remoción de DBO₅, DQO, SST y coliformes, tomando como referencia los parámetros de diseño y las eficiencias reportadas para humedales artificiales de flujo subsuperficial.

- **Selección del medio filtrante**

El material filtrante comprende el tipo de grava, arena y suelo de terreno natural para conformar el sustrato. Lo cual garantiza la permeabilidad adecuada, estabilidad estructural y soporte para las raíces de las plantas.

- **Vegetación (micrófitos)**

Se seleccionaron especies con alta tolerancia a aguas residuales y capacidad de transferencia de oxígeno a la rizosfera. Las especies definidas para el sistema fueron aquellas presentes de forma natural en el entorno del río Alameda *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*, usando la ecuación.

$$NP = \frac{S}{A * 0.866}$$

Donde:

- NP : Número de plantas
- S : Superficie a sembrar
- A : Área ocupada por la planta

A continuación, se presenta una tabla resumen que integra los principales parámetros y cálculos realizados para el diseño del sistema. En la tabla 5, se incluyen los valores determinados para variables hidráulicas, geométricas y operacionales, tales como el caudal de diseño,

constante cinética ajustada por temperatura, tiempo de retención hidráulico, área superficial requerida, dimensiones del humedal y demás criterios considerados.

Tabla 5.

Variables de diseño para el dimensionamiento del humedal artificial

HUMEDAL SUBSUPERFICIAL			
Datos			
Caudal de diseño (m ³ /día)		2.016	
Número de unidades		2	
Caudal por unidad (m ³ /día)	Q	1.008	
Temperatura (°C)	T	19.80	
DBO Afluente (mg/l)	Co	60.66	
DBO Efluente (mg/l)	Ce	15	
Eficiencia de remoción		0.753	
Constante para 20 °C	K20	0.23	
Altura adoptada	d	0.6	0.3 - 1
Porosidad del medio	n	0.436	
Pendiente	S	0.005	

Fuente: Datos tomados de los cálculos realizados y muestras.

Para el dimensionamiento del humedal subsuperficial se consideró un caudal de diseño total de 2.016 m³/día, el cual fue distribuido en dos unidades, obteniéndose un caudal de 1.008 m³/día por unidad. La meta de tratamiento se estableció en función de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), previo análisis en laboratorio tomando como valores de entrada y salida 60.66 mg/L y 15 mg/L, respectivamente.

Tabla 6.

Dimensionamiento del humedal artificial de acuerdo a los parámetros de diseño requeridos

Dimensionamiento cada unidad			
Remoción de DBO			
Constante corregida con temperatura DBO	Kt	0.227	
Tiempo de retención hidráulico calculado (día)	Día0	6.15	
Área superficial	As	23.686	m ²
Rectangular			
Relación larga: ancho		2	
Ancho de humedal	Anc	3.4	m
Largo de humedal	L	6.9	m
Tiempo de retención hidráulico (día)	t	6.15	
Q comprobación			
Conductividad hidráulica del medio filtrante		4.33	cm/s
Conductividad hidráulica del medio filtrante		3741.12	m ³ /m ² *día
Área de sección transversal		2.06	
	Q	38.624	m³/día

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

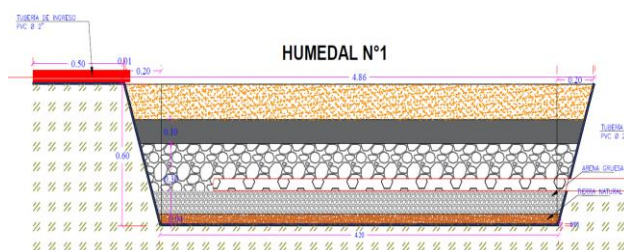
2.2.4.3. Diseño detallado de HSSF

a. Geometría del humedal

El Humedal N.º 1 corresponde a un humedal de flujo subsuperficial horizontal, diseñado con estratificación de materiales filtrantes y un sistema de distribución e ingreso de agua debidamente controlado. El corte transversal muestra que la estructura está conformada por una excavación trapezoidal revestida por capas sucesivas de sustratos, cuya función es permitir la filtración, retención y degradación de la materia orgánica.

Figura 5.

Diseño en perfil del humedal N° 1



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

En la parte inferior de la figura 5, se observa una capa de soporte de grava gruesa, sobre la cual se dispone una red de tubería perforada que actúa como conducto de distribución uniforme del caudal afluente. Por encima de esta capa se coloca grava de menor tamaño y posteriormente una capa superior de material más fino (arena gruesa). Toda la estructura incorpora una geomembrana plástica lateral y de fondo, destinada a evitar infiltraciones hacia el suelo natural y garantizar que el flujo se mantenga dentro del sistema de tratamiento. El sistema de ingreso y salida se tiene por tuberías PVC de 2".

b. Estructura filtrante

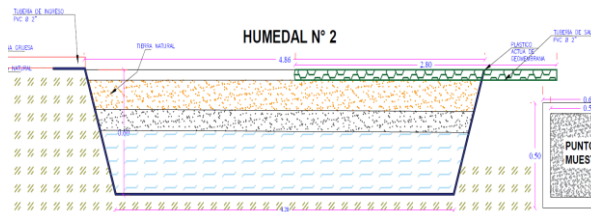
- Grava gruesa
- Grava fina
- Arena

c. Sistema de tuberías

- Tubería de entrada
- Tubería perforada de distribución
- Tubería de salida

Figura 6.

Diseño en perfil del humedal N° 2



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

En la Figura 6 se observa la estructura del humedal subsuperficial, conformada por una capa de grava gruesa con tubería perforada para la distribución del afluente, una capa de grava de menor tamaño y una capa superior de arena gruesa. El sistema incorpora una geomembrana

en el fondo y laterales para evitar infiltraciones, así como tuberías de ingreso y salida de PVC de 2". Este diseño garantiza un flujo subsuperficial continuo, favoreciendo el contacto del agua con el medio filtrante y la remoción de contaminantes, además de asegurar el tiempo de retención hidráulica previsto en el diseño.

Figura 7.

Diseño en planta del punto de muestreo.



Fuente: Captura de imagen tomada del diseño de AutoCAD.

La figura 7, punto de muestreo es una estructura diseñada específicamente para la recolección del humedal subsuperficial. La presencia de una tubería de entrada de PVC de 2" permite dirigir el flujo hacia el punto definido, lo cual asegura que las muestras recolectadas sean representativas del agua que ha pasado por todo el sistema de tratamiento. El diseño rectangular del punto de muestreo, junto con las dimensiones indicadas, facilita el acceso para la toma de muestras y reduce la posibilidad de contaminación externa durante el muestreo. Además, la ubicación del punto de salida al final del humedal garantiza que el agua haya cumplido el tiempo de retención hidráulico establecido en el dimensionamiento teórico, permitiendo evaluar correctamente la eficiencia del sistema.

2.2.4.4. Procedimiento de recolección y preservación de muestras.

El muestreo fue de tipo puntual, realizado a las 17:00 horas en condiciones de flujo estable. Se emplearon los siguientes recipientes según el tipo de parámetro:

- Frascos de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 litro para parámetros físico-químicos (DBO₅, DQO, SST, OD, nitrógeno total, fósforo total, turbiedad, conductividad y pH).
- Frascos de vidrio estériles de 250 mL para el análisis microbiológico de coliformes termo tolerantes.

Las muestras fueron preservadas bajo refrigeración a 4 °C en cooler térmico con hielo en gel y transportadas al laboratorio dentro de las 24 horas posteriores a su recolección, cumpliendo con la cadena de custodia establecida por el laboratorio acreditado.

2.2.4.5. Parámetros evaluados y métodos analíticos.

Los análisis fueron realizados por el laboratorio Servicios Analíticos Generales S.A.C. (SAG), acreditado ante el INACAL-DA (Sede Lima 1) e IAS-829, ubicado en Av. Naciones Unidas N° 1565, Lima – Perú. Los métodos empleados corresponden a las metodologías estándar SMEWW-APHA-AWWA-WEF, 24.^a edición (2023), conforme a los Informes de Ensayo N° 1913004-2025, 1913051-2025, 1914899-2025 y 1914912-2025.

En la tabla 7, se detallan los parámetros evaluados, el método aplicado, la unidad de

medida y el límite de cuantificación correspondiente.

Tabla 7.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados y métodos analíticos

Parámetro	Tipo	Método SMEWW	Unidad	L.C.
pH	Físico	Part 4500-H ⁺ F	Unid. pH	No aplica
Turbiedad	Físico	Part 2130 B	NTU	0.4
Conductividad	Físico	Part 2510 B	µS/cm	—
DBO ₅	Químico	Part 5210 B	mg/L	2
DQO	Químico	Part 5220 D	O ₂ mg/L	10
OD	Químico	Part 4500-O C	O ₂ mg/L	0.5
Nitrógeno Total	Químico	Part 4500-N C	NO ₃ -N mg/L	0.15
Fósforo Total	Químico	Part 4500-P B/ P	mg/L	0.013
SST	Químico	Part 2540 D	mg/L	3
Coliformes Termotolerantes	Microbiológico	Part 9221 E-1	NMP/100mL	1.8

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

2.2.4.6. Resultados de laboratorio

- Resultados obtenidos antes del tratamiento

En la tabla 8, se observa los resultados obtenidos en el análisis del agua residual antes del tratamiento muestran una condición de contaminación considerable. Se observa 5.69 mg/L, muestra que el agua tiene mucho fósforo, más de lo que normalmente debería encontrarse en aguas naturales. El pH medido (7.33) está dentro de un valor normal, ligeramente alcalino. El valor alto del Fósforo indica que el agua podría causar problemas de contaminación, como el crecimiento excesivo de algas. El valor de pH es adecuado para que los microorganismos del humedal trabajen bien y ayuden en el proceso de limpieza del agua.

Tabla 8.

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el pre-tratamiento

RESULTADOS PRETRATAMIENTO		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	60.66
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	191
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	155.4
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	4.6
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	986
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	45
Conductividad	µS/cm	49.72
Phosphorus (fósforo): Total phosphorus (fósforo total)	P mg/L	5.69
pH	Unid. pH	7.33*
Turbiedad	NTU	49.72
Numeración de Coliformes Fecales	NMP/100mL	350*10 ⁶

Fuente. Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo

Los resultados del pretratamiento evidenciaron una alta carga contaminante en el agua residual. La DBO₅ (60.66 mg/L) y la DQO (191 mg/L) indicaron una importante presencia de materia orgánica, con una biodegradabilidad moderada que hace viable su tratamiento mediante humedales artificiales.

El fósforo total (155.4 mg/L) presentó una concentración elevada, representando un riesgo de eutrofización, mientras que el nitrógeno total (4.6 mg/L) mostró una baja contribución a la contaminación.

Asimismo, los sólidos suspendidos totales (986 mg/L) reflejaron una alta carga de material particulado responsable de la turbidez, y la elevada concentración de coliformes fecales (350 × 10⁶ NMP/100 mL) confirmó una contaminación de origen doméstico. En conjunto, estos resultados justifican la aplicación de humedales artificiales como alternativa de tratamiento.

Por su parte, los resultados del postratamiento evidenciaron mejoras significativas en los parámetros físicos y en algunos parámetros químicos, demostrando la eficacia parcial del sistema implementado.

Según las tablas 8 y 9, los Sólidos Suspendidos Totales (TSS) se reducen drásticamente de 986 mg/L antes del tratamiento a 31.23 mg/L después del tratamiento, acompañados por una disminución de la turbiedad de 49.72 NTU a 18 NTU. Asimismo, el Fósforo Total muestra una remoción altamente eficiente, descendiendo de 155.4 mg/L a 5.87 mg/L, lo que indica una reducción importante del potencial eutrofizante del efluente.

- Resultados obtenidos después del tratamiento

Tabla 9.

Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del SAG en el postratamiento

RESULTADOS POSTRATAMIENTO		
Ensayo	Unidades	Resultados
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	63.75
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	126.7
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	31.23
Fósforo Total o fósforo (P)	P mg/L	5.87
Nitrógeno total (persulfato)	NO ₃ ⁻ -N mg/L	43.28
Oxígeno Disuelto OD	O ₂ mg/L	2.1
Conductividad	µS/cm	1051
Turbiedad	NTU	18
pH	Unid. pH	6.84
Numeración de Coliformes Fecales (Coliformes Termotolerantes)	NMP/100mL	280*10 ⁶

Fuente: Resultados obtenidos a partir de los análisis de laboratorio SAG consignados en el Anexo.

Según las tablas 8 y 9, se observa el descenso del oxígeno disuelto de 45 mg/L a 2.1 mg/L evidencia un alto consumo de oxígeno asociado a

procesos bioquímicos del tratamiento, lo que puede generar condiciones limitantes para usos posteriores del efluente. Asimismo, la reducción de coliformes fecales es limitada (de 350×10^6 a 280×10^6 NMP/100 mL), manteniéndose concentraciones microbiológicas elevadas.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

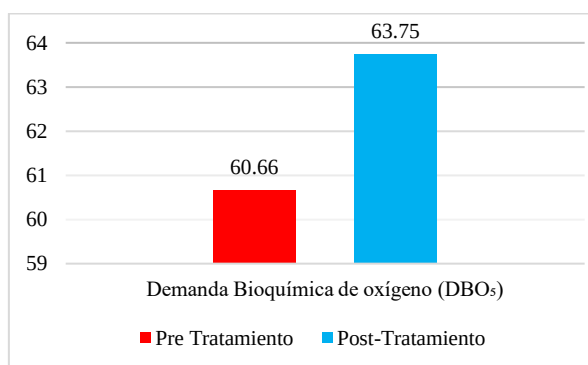
3.1.1. Evaluar la reducción de DBO, DQO y OD en las aguas residuales, aplicando humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis*.

El objetivo fue cuantificar la eficiencia de humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la remoción de DBO₅ y DQO en aguas residuales del río Alameda, mediante análisis comparativos antes y después del tratamiento.

3.1.1.1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Figura 8.

Resultados de la Demanda Bioquímica (DBO₅) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 8, se observa que la DBO₅ presentó un ligero incremento de 60.66 mg/L a 63.75 mg/L después del tratamiento, indicando que el humedal subsuperficial no logró una reducción significativa de la materia orgánica biodegradable durante el periodo evaluado.

Este comportamiento puede atribuirse a la etapa inicial de funcionamiento del sistema y a variaciones en la carga orgánica e hidráulica. De acuerdo con Kadlec y Wallace (2009) y Vymazal (2007), los humedales artificiales requieren un periodo de maduración para alcanzar su máxima eficiencia de remoción. Por ello, se considera que, con un mayor tiempo de operación y la estabilización de los procesos biológicos, el sistema puede mejorar progresivamente su desempeño en el tratamiento del agua residual.

• Remoción

Aplicando la ecuación:

$$nDBO = \frac{60.66 - 63.75}{60.66} * 100$$

$$nDBO = -5.09 \%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de -5.09%.

La ausencia de remoción efectiva de DBO₅ sugiere que el sistema no alcanzó condiciones óptimas para la degradación biológica de la materia orgánica biodegradable durante el periodo de evaluación.

Este comportamiento puede explicarse por:

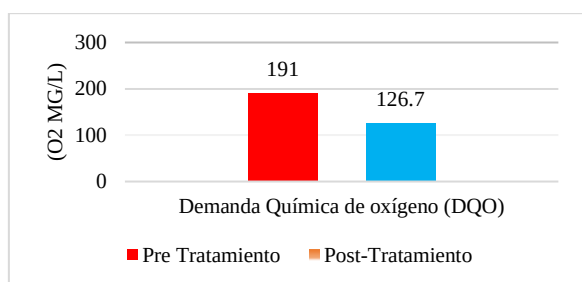
- Tiempo de retención hidráulica insuficiente.
- Condiciones predominantemente anóxicas en el lecho filtrante.

- Alta carga orgánica inicial.
- Periodo de maduración vegetal incompleto.
- Baja temperatura ambiental que reduce la actividad microbiana.

3.1.1.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Figura 9.

Resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la figura 9, se observa el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) antes y después del tratamiento mediante el humedal subsuperficial. En el pretratamiento, la DQO registró un valor de 191 mg/L, mientras que en el postratamiento disminuyó a 126.7 mg/L. Esta reducción evidencia que el humedal logró remover una parte de las sustancias oxidables presentes en el agua residual.

Este resultado indicó que el sistema es efectivo para reducir la carga contaminante total, que incluye tanto materia orgánica como compuestos inorgánicos. Si bien el valor obtenido en el postratamiento aún no corresponde a un agua de buena calidad, la disminución observada confirma que el humedal contribuye de manera positiva al mejoramiento del agua residual, y que su eficiencia podría incrementarse con un mayor

tiempo de operación y la estabilización del sistema.

Asimismo, la comparación entre los valores de DQO y DBO₅ permitió interpretar el grado de biodegradabilidad del agua residual. En la etapa de pretratamiento, la relación DQO/DBO₅ fue mayor a 2.5, lo que indica una baja biodegradabilidad y la presencia de compuestos orgánicos de difícil degradación biológica. Luego del tratamiento, esta relación se mantuvo elevada, debido a que, si bien la DQO disminuyó, la DBO₅ no presentó reducción significativa.

• Remoción

Aplicando la ecuación:

$$nDQO = \frac{191 - 126.7}{191} * 100$$

$$nDQO = 33.67 \%$$

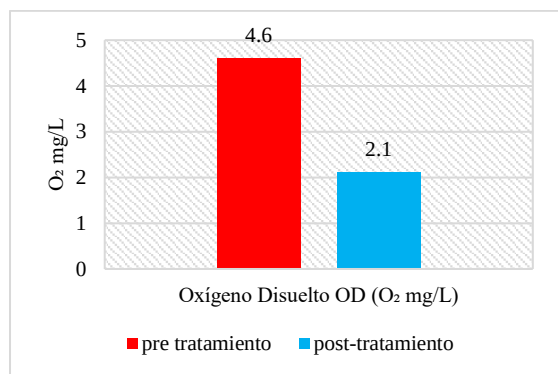
Se obtuvo una eficiencia de remoción de 33.67%.

La reducción observada indica una disminución moderada de la carga orgánica total presente en el agua residual. Este comportamiento atribuye principalmente a procesos combinados de sedimentación, filtración y degradación parcial de compuestos orgánicos. No obstante, la eficiencia obtenida se encuentra por debajo de los valores reportados en sistemas maduros de humedales artificiales, lo que sugiere limitaciones operativas como tiempo de retención hidráulica insuficiente o periodo de estabilización biológica incompleto.

3.1.1.3. Oxígeno Disuelto (OD)

Figura 10.

Resultados de Oxígeno Disuelto (OD) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 10, se observa una disminución del oxígeno disuelto de 4.6 mg/L a 2.1 mg/L después del tratamiento. Este comportamiento es característico de los humedales de flujo subsuperficial, donde los microorganismos consumen oxígeno durante la degradación de la materia orgánica y la limitada transferencia de oxígeno desde la atmósfera reduce su concentración. La disminución del OD evidencia la actividad biológica del sistema y confirma el desarrollo de los procesos de tratamiento dentro del humedal.

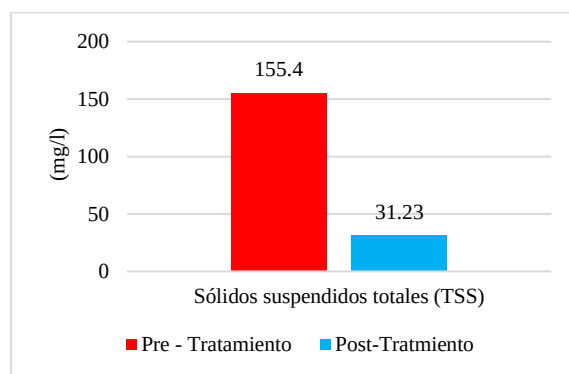
3.1.2. Determinar la eficiencia de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la disminución de sólidos suspendidos totales (SST)

El objetivo fue evaluar la eficiencia de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), comparando las

concentraciones de entrada y salida del sistema. Se observó el desarrollo de nuevos brotes y la retención de materiales sólidos entre las raíces y rizomas, evidenciando la capacidad del sistema radicular para actuar como un filtro natural. Los resultados permitieron determinar la eficiencia del humedal bajo las condiciones ambientales y las cargas contaminantes del río Alameda, considerando las variaciones registradas durante el periodo de evaluación.

Figura 11.

Resultados de la Sólidos suspendidos totales (SST) en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 11, se observa una reducción significativa de los Sólidos Suspendidos Totales (SST), de 155.40 mg/L a 31.23 mg/L después del tratamiento. Este resultado evidencia la alta eficiencia del humedal subsuperficial en la retención y filtración de sólidos, favorecida por el sustrato y el flujo lento del agua. Asimismo, la disminución de los SST contribuyó a reducir la turbiedad y mejorar la calidad del agua tratada.

• Remoción

Aplicando la ecuación:

$$n_{SST} = \frac{155.4 - 31.23}{155.4} * 100$$

$$nSST = 79.90 \%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de 79.90 %.

Este resultado evidencia una alta eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos, atribuida principalmente a los procesos de filtración y sedimentación en el medio granular del humedal. La porosidad del sustrato y el desarrollo del sistema radicular favorecieron la retención de partículas, mejorando significativamente la calidad del agua tratada.

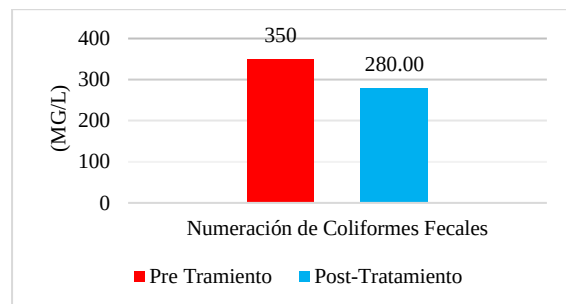
3.1.3. Evaluar el efecto del uso de humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* en la reducción de coliformes fecales

El análisis permitió evaluar la capacidad de los humedales artificiales con *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* para reducir los coliformes fecales en aguas residuales.

Los resultados del pretratamiento evidenciaron una alta contaminación microbiológica, con concentraciones de 350×10^6 y 280×10^6 NMP/100 mL, propias de aguas residuales domésticas sin tratamiento. Estos valores reflejan un importante riesgo sanitario y ambiental, justificando la implementación de humedales artificiales como alternativa para disminuir la carga de microorganismos patógenos.

Figura 12.

Resultados de la Numeración de Coliformes Fecales en el pretratamiento y postratamiento



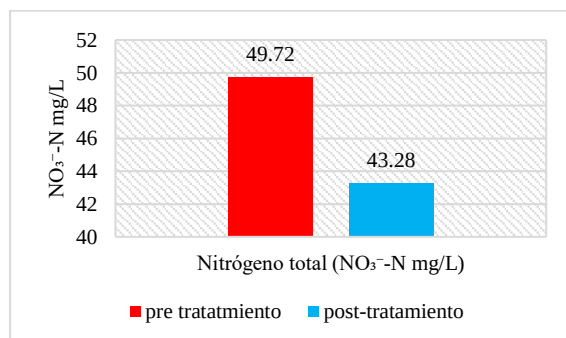
Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

El análisis de la numeración de coliformes fecales evidencias que el tratamiento aplicado logró una reducción de la carga microbiológica, pasando de un valor inicial de 350 a 280 unidades en el período post-tratamiento. Esta disminución indica que el sistema de tratamiento tiene un efecto positivo en la remoción parcial de microorganismos indicadores de contaminación fecal. No obstante, la reducción observada es moderada, lo que sugiere que el proceso no fue completamente eficiente en la eliminación de coliformes fecales.

3.1.3.1. Nitrógeno Total

Figura 13.

Resultados de la Numeración de Nitrógeno total en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 13 se observa una reducción del nitrógeno total, pasando de 49.72 NO₃⁻-N mg/L en el pretratamiento a 43.28 NO₃⁻-N mg/L en el postratamiento, evidenciando que el sistema contribuye a la reducción de este nutriente durante el tratamiento.

Esta remoción se atribuye a procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación que ocurren en las zonas aerobias y anóxicas del sustrato respectivamente, así como a la asimilación directa de nitrógeno por parte de las raíces de *Canna tuerckheimii* y *Phragmites australis* para su metabolismo vegetal.

Remoción.

Aplicando la ecuación 1:

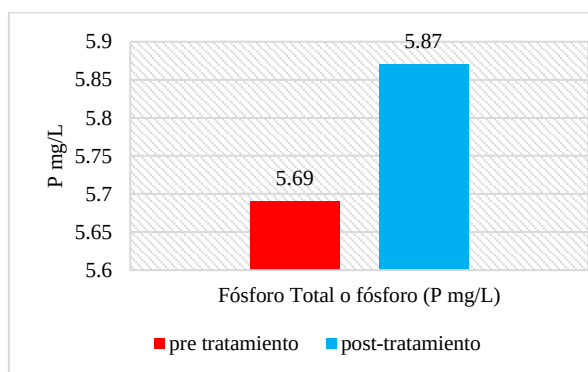
$$n\text{Nitrógeno} = \frac{49.72 - 43.28}{49.72} * 100$$

$$n\text{Nitrógeno} = 12.95\%$$

3.1.3.2. Fósforo Total.

Figura 14.

Resultados de Fósforo total en el pretratamiento y postratamiento.



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 14, se observa un ligero incremento en la concentración de fósforo total, pasando de 5.69 P mg/L en el pretratamiento a 5.87 P mg/L

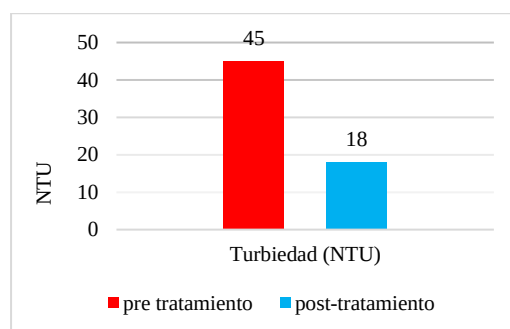
en el postratamiento, lo que representa una variación de +0.18 mg/L (+3.16%).

Este comportamiento se explica por la liberación de fósforo desde el sustrato granular durante la etapa de arranque del humedal, proceso conocido como "desorción de fósforo", en el cual el medio filtrante nuevo libera fosfatos previamente adsorbidos o presentes en los materiales que lo componen. Adicionalmente, la descomposición de materia orgánica acumulada en el sustrato genera fósforo inorgánico soluble que se reincorpora al agua tratada.

3.1.3.3. Turbiedad

Figura 15.

Resultados de la turbiedad en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 15, se observa una disminución significativa de la turbiedad después del tratamiento, pasando de 45 NTU en el pretratamiento a 18 NTU en el postratamiento. Esta reducción es coherente con la disminución de SST registrada, dado que la turbiedad está directamente relacionada con la concentración de partículas en suspensión en el agua.

La remoción de turbiedad se atribuye a los procesos físicos de sedimentación y filtración que

ocurren en el sustrato del humedal, así como a la retención de sólidos por el sistema radicular de la vegetación. La mejora observada refleja una ganancia en la calidad visual y física del agua tratada.

- **Remoción**

Aplicando la ecuación 1:

$$nturbiedad = \frac{45 - 18}{45} * 100$$

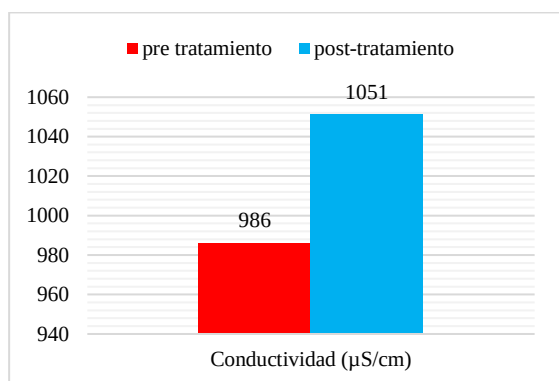
$$nturbiedad = 60.0\%$$

Se obtuvo una eficiencia de remoción de turbiedad de 60.0%, lo que evidencia la capacidad del humedal artificial para clarificar el agua residual mediante los procesos de filtración y sedimentación que ocurren en el sustrato granular. Este resultado confirma una mejora significativa en la calidad física del agua tratada, reduciendo de 45 NTU a 18 NTU, valor que representa una disminución considerable de la opacidad del efluente.

3.1.3.4. Conductividad eléctrica.

Figura 16.

Resultados de conductividad eléctrica en el pretratamiento y postratamiento



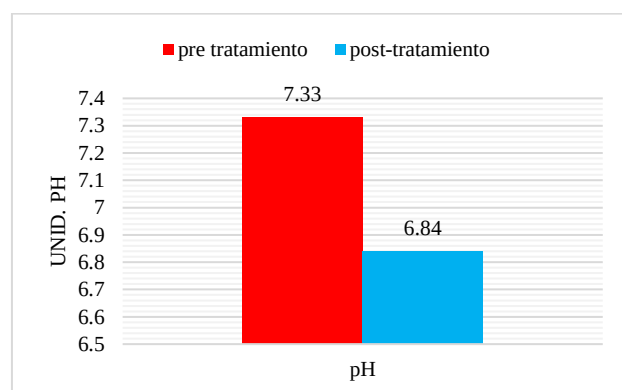
Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 16, se observa un incremento de la conductividad eléctrica de 986 μS/cm a 1051 μS/cm después del tratamiento. Este comportamiento es normal en humedales artificiales y se atribuye a la liberación de iones del sustrato, la mineralización de la materia orgánica y la evapotranspiración de la vegetación, procesos propios de la etapa inicial de funcionamiento que tienden a estabilizarse con la maduración del sistema.

3.1.3.5. PH

Figura 17.

Resultados del Ph en el pretratamiento y postratamiento



Nota. Elaboración propia, adjuntado valores previos de las tablas 8 y 9.

En la Figura 17, se observa una ligera disminución del pH, de 7.33 a 6.84 después del tratamiento. Ambos valores se mantienen dentro del rango establecido por el D.S. N.º 003-2010-MINAM (6.5–8.5), por lo que el efluente cumple con la normativa. Esta variación se atribuye a la producción de CO₂ durante la degradación biológica de la materia orgánica, comportamiento normal en humedales artificiales que no afecta la calidad del agua tratada.

3.2. Discusiones

- El incremento de la DBO₅ después del tratamiento se atribuye principalmente al aumento del caudal durante la temporada de lluvias, lo que redujo el tiempo de retención hidráulica y la eficiencia del humedal. Este comportamiento coincide con la literatura, que indica que los humedales en etapa inicial o bajo condiciones hidráulicas desfavorables presentan baja remoción de materia orgánica biodegradable.
- La reducción de la DQO y de los sólidos suspendidos totales demuestra que el humedal fue eficiente en la disminución de la carga orgánica total y en la retención de partículas mediante procesos de filtración y sedimentación. Sin embargo, la remoción de la DBO₅ fue insuficiente, lo que evidencia la necesidad de optimizar el sistema y prolongar su tiempo de operación.
- La disminución del oxígeno disuelto es un comportamiento característico de los humedales de flujo subsuperficial debido al consumo de oxígeno por los microorganismos. No obstante, el valor obtenido (2,1 mg/L) no cumple con el ECA para la

protección de la vida acuática, por lo que sería necesario incorporar medidas complementarias de aireación si el efluente será descargado a un cuerpo receptor.

- La comparación con la normativa peruana (D.S. N.° 003-2010-MINAM, Norma Técnica OS.090 y ECA D.S. N.° 004-2017-MINAM) muestra que el humedal cumple satisfactoriamente en la remoción de sólidos suspendidos y reduce parcialmente la DQO; sin embargo, presenta limitaciones en la remoción de DBO₅, fósforo, coliformes fecales y oxígeno disuelto. En consecuencia, el sistema constituye una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, pero requiere optimización en su diseño y operación para alcanzar el cumplimiento de los estándares ambientales.

CAPITULO IV.

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El análisis conjunto de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), en concordancia con los fundamentos del tratamiento de aguas residuales mediante humedales subsuperficiales descritos en el marco teórico, permitió evaluar el

comportamiento de la carga orgánica antes y después del tratamiento. De acuerdo con la metodología empleada, que incluyó la medición de estos parámetros en el afluente y efluente del sistema, los resultados obtenidos evidenciaron que la DBO₅ no presentó una reducción significativa, observándose incluso un ligero incremento en su valor.

- El humedal subsuperficial mostró una reducción significativa de la DQO, evidenciando su capacidad para disminuir la carga orgánica total; sin embargo, la DBO₅ presentó un ligero incremento, lo que indica que el sistema aún requiere un mayor tiempo de operación para alcanzar una adecuada eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable.
- Los sólidos suspendidos totales disminuyeron de 986 mg/L a 31,23 mg/L, demostrando una alta eficiencia del humedal en la remoción de sólidos mediante procesos de filtración y sedimentación.
- El tratamiento permitió reducir los coliformes fecales, evidenciando una mejora microbiológica del agua; sin embargo, los valores obtenidos aún no cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), por lo que se requiere optimizar el sistema e incorporar procesos complementarios de desinfección.
- La disminución del oxígeno disuelto reflejó la actividad biológica propia del humedal; no obstante, el valor final de

2,1 mg/L no cumple con el ECA para la protección de la vida acuática, por lo que se recomienda implementar medidas de aireación o tratamientos complementarios.

- En términos generales, el humedal artificial constituye una alternativa sostenible para mejorar la calidad del agua del río Alameda; sin embargo, es necesario optimizar su diseño y operación para cumplir con los Estándares de Calidad Ambiental y garantizar un tratamiento más eficiente.

4.2. Recomendaciones .

- Se recomienda mantener el funcionamiento del humedal por un mayor tiempo y realizar monitoreos periódicos de la DBO₅ para evaluar la maduración del sistema y su eficiencia en la remoción de materia orgánica.
- Se recomienda conservar las condiciones actuales de operación del humedal y realizar un seguimiento periódico de la DQO para verificar la estabilidad de su eficiencia de remoción.
- Se recomienda optimizar el diseño y la operación del humedal, incrementar el tiempo de retención hidráulica y complementar el tratamiento con una etapa de desinfección, además de efectuar monitoreos periódicos para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua

Referencias bibliográficas

- Carbo Gomez, A., & Vidal Marco, O. (1978).
MARQUEO DE PLANTACIONES.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1978_21.pdf
- Kadlec, R. H. ., & Wallace, S. D. . (2009).
Treatment wetlands. CRC Press.
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*.
https://www.abpsoil.com/images/Books/Wastewater_Engineering_Treatment_Resource_Recovery_Metcalf_Eddy_5th.pdf
- Montes Iturrizaga, D., Aponte, H., & Valle Rubio, S. (2023). A new artificial wetland in the central coast of Perú: First characterization of its avifauna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales*, 47(183), 352-370.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1883>
- Nava Rojas, J., & Lango Reynoso, F. (2023). Pollutant Removal in Subsurface Flow Artificial Wetlands: A Review. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>