

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en
humedales de flujo sub superficial horizontal, planta de tratamiento de aguas
residuales “La Totora” - Ayacucho 2023

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

PRESENTADO POR:

Bach. Carlos Fares Soto Pretel

ASESOR:

MSc. Ing. Edward León Palacios

AYACUCHO - PERÚ

2024

Dedicatoria

A mis padres Eulogio y Edilberta por sus consejos.

A mi esposa Yuly por su incansable e interminable apoyo.

A mi hermano Elías y Suegro Juan por su colaboración y aliento para seguir con mi formación académica.

A ellos dedico esta tesis por ser parte integral de mi camino académico y personal y a todos quienes creyeron en mí; de ellos, me declaro deudor por su apoyo incondicional.

Carlos F. Soto Pretel

Agradecimientos

Como autor del presente trabajo de investigación quiero dejar constancia mi gratitud y agradecimiento a las siguientes instituciones y personas:

La primera casa superior de estudios de Ayacucho, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil por aceptar y permitir acogerme a sus directivas y cumplir mis sueños de obtener el ansiado título.

Al Mg. Ing. Hermes QUISPE CUADROS impulsor y guía, al presente trabajo de investigación.

Al Mg. Ing. Edward LEON PALACIOS, asesor del presente trabajo, por su orientación y recomendaciones para culminar con esta labor.

Al MSc. Ing. Jaime L. BENDEZÚ PRADO por sus sugerencias y apreciaciones durante la revisión del trabajo de tesis.

Al Dr. Carlos E. CARRASCO BADAJOZ, Jefe del Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (BIOSIG) de la Facultad de Ciencias Biológicas – UNSCH por su apoyo.

Al Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Ayacucho S.A. SEDA – Ayacucho, al Blgo. Rudecindo HUINCHO RODRÍGUEZ, por su valiosa colaboración.

A Giancarlo SOTO B. por los pincelazos finales en el diseño.

A Gilber GÓMEZ T., por el aporte y apoyo durante la realización del trabajo de investigación.

A mi familia, por el apoyo y el entusiasmo que me han transmitido durante este proceso de formación, aprendizaje y en la obtención del título profesional.

De todos ellos me considero deudor no solo por su estímulo y colaboración, sino también por la visión y perspectiva que solo los sabios pueden aportar.

Carlos F. Soto Pretel

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Índice	iii
Índice De Tablas	vi
Índice De Figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Introducción	xi
Capítulo I	1
1. Planteamiento Del Problema	1
1.1. Descripción Del Problema	1
1.1.1. Problemática Mundial	1
1.1.2. Problemática nacional	2
1.1.3. Problemática regional	2
1.2. Delimitación Del Problema	3
1.2.1. Espacial	3
1.2.2. Temporal	6
1.2.3. Temática y unidad de análisis	6
1.3. Formulación del problema	6
1.3.1. Problema general	6
1.3.2. Problemas específicos	6
1.4. Justificación e importancia	6
1.4.1. Justificación teórica	6
1.4.2. Justificación Práctica	7
1.4.3. Justificación Metodológica	7
1.4.4. Importancia.	7
1.5. Limitaciones de la investigación	8
1.6. Objetivos	8
1.6.1. Objetivo general	8
1.6.2. Objetivos específicos	8
Capítulo II	9
2. Marco Teórico	9
2.1. Antecedentes	9
2.1.1. Investigaciones Internacionales	9
2.1.2. Investigaciones nacionales	10
2.2. Bases teóricas	12

2.2.1.	Las aguas residuales	12
2.2.2.	Clasificación de las aguas residuales	12
2.2.3.	Características de las aguas residuales	13
2.2.4.	Etapas de tratamiento de las aguas residuales	14
2.2.5.	Los humedales artificiales.	14
2.2.6.	Clasificación de humedales artificiales.	16
2.2.7.	Criterios de Diseño	19
2.2.8.	Mecanismos en la remoción de contaminantes en humedales artificiales. .	20
2.2.9.	Partes de los humedales de flujo subsuperficial	21
2.2.10.	Enfoque y aplicación de humedales de Flujo Horizontal - HAFSSH	24
2.2.11.	Características del sustrato como medio granular.	24
2.2.12.	Efecto del sustrato como medio granular en humedales.	27
Capítulo III	.....	29
3. Método De La Investigación	.....	29
3.1. <i>Enfoque</i>	.....	29
3.2. <i>Alcance</i>	.....	29
3.3. <i>Diseño de la Investigación</i>	.....	29
3.4. <i>Población y Muestra</i>	.....	29
3.5. <i>Hipótesis</i>	.....	29
3.5.1.	Hipótesis General	29
3.5.2.	Hipótesis Específicas	30
3.5.3.	Planteamiento de la Hipótesis Nula y Alterna (H0 y H1).	30
3.6. <i>Operacionalización de Variables, Definición Conceptual y Operacional</i>	.....	30
3.7. <i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i>	.....	31
3.7.1.	Técnicas	31
3.7.2.	Instrumentos	34
3.8. <i>Técnicas Estadísticas para el Procesamiento de Información</i>	.....	34
3.9. <i>Desarrollo del Trabajo de Tesis</i>	.....	34
3.9.1.	Identificación de la zona del proyecto	34
3.9.2.	Actividades preliminares	35
3.9.3.	Diseño y construcción de los humedales (HAFSSH)	36
3.9.4.	Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)	41
3.9.5.	Toma de muestras	42
Capítulo IV	.....	44
4. Resultados	.....	44
4.1. <i>Contrastación de Hipótesis</i>	.....	44
4.1.1.	Planteamiento de la Hipótesis.	44
4.1.2.	Verificación de la hipótesis	44

4.1.3.	Contrastación de la hipótesis con los resultados	44
4.1.4.	Nivel de Significación	44
4.1.5.	Función de prueba	45
4.1.6.	Región crítica:	45
4.2.	Análisis e interpretación	45
4.2.1.	Dimensionamiento del Sistema de Humedales Artificiales	45
4.2.2.	Resultados de Diámetro efectivo calculado, porosidad y Tiempo de retención hidráulica en los 03 humedales.....	45
4.2.3.	Evaluación y análisis estadístico a partir de resultados In Situ y en Laboratorios.	46
4.3.	Discusión de resultados.....	68
Capítulo V	.....	72
5.	Conclusiones	72
5.1.	Conclusiones	72
5.2.	Recomendaciones	73
5.3.	Trabajos Futuros	74
Referencias Bibliográficas	.....	75
Lista de Abreviaturas	.....	79
Glosario	.....	80
Anexos	.....	82

Índice De Tablas

Tabla 1 Clasificación de los parámetros del agua residual.....	13
Tabla 2 Principales mecanismos para la eliminación de contaminantes y patógenos en humedales para tratamiento.....	21
Tabla 3 Eficiencias de eliminación típicas de los principales tipos de humedales para tratamiento.....	21
Tabla 4 Operacionalización de variables.....	30
Tabla 5 Indicadores e instrumentos de recolección de datos.	33
Tabla 6 Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	36
Tabla 7 Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.....	37
Tabla 8 Dimensionamiento de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal. ..	37
Tabla 9 Materiales para el proceso constructivo de 06 humedales artificiales (HAFSSH). ..	38
Tabla 10 Cuadro resumen de la granulometría de los sustratos y porosidad calculada a partir de los diámetros efectivos (De).....	45
Tabla 11 Porosidad calculada a partir de los diámetros efectivos (De) de cada sustrato	45
Tabla 12 Cuadro de resultados del tiempo de retención hidráulica (TRH) en los 03 humedales	46
Tabla 13 Valores de los parámetros analizados en el Afluyente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Abril 2023.	47
Tabla 14 Valores de los parámetros analizados en el Afluyente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Mayo del 2023.	47
Tabla 15 Valores de los parámetros analizados en el Afluyente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Junio del 2023.	48
Tabla 16 Valores de los parámetros analizados en el Afluyente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Julio del 2023.	48
Tabla 17 Valores de los parámetros analizados en el Afluyente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Agosto del 2023.....	49
Tabla 18 Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Abril 2023.....	58
Tabla 19 Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Mayo 2023.	58
Tabla 20 Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Junio 2023.....	58
Tabla 21 Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Julio 2023.....	59

Tabla 22 Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Agosto 2023.	59
Tabla 23 ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción de la Temperatura °C, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	60
Tabla 24 ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción del Potencial de Hidrógenos (pH), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4". ...	61
Tabla 25 ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Conductividad Eléctrica, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	62
Tabla 26 ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Sólidos Totales Disueltos, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	63
Tabla 27 ANVA y Test de Duncan par	64
Tabla 28 ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Coliformes Fecales, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	65
Tabla 29 ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Fosfatos PO_4^{-3} (mg/L), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	66
Tabla 30 ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Nitratos NO_3 (mg/L), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".....	67

Índice De Figuras

Figura 1 Fotografía satelital, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” .	4
Figura 2 Zona de estudio, interior de la PTAR – sedimentadores, humedales artificiales.	4
Figura 3 Esquema general de la PTAR “la Totorá”, indica el lugar del proyecto de tesis.	5
Figura 4 Clasificación de los humedales artificiales con macrófitas.	16
Figura 5 Clasificación de los humedales artificiales según flujo hidráulico.	16
Figura 6 Esquema general de los humedales de tratamiento.	18
Figura 7 Esquema de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.	19
Figura 8 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH).	19
Figura 9 Esquema de un humedal artificial.	28
Figura 10 Procedimiento del Trabajo de Investigación.	32
Figura 11 Ubicación del punto de proyecto y el flujo de recorrido de aguas residuales.	35
Figura 12 Diseño de los humedales, vistas de planta, lateral e isométrico.	39
Figura 13 Imagen renderizado de los humedales artificiales de (HAFSSH)	39
Figura 14 Proceso constructivo de los humedales artificiales (HAFSSH).	40
Figura 15 Distancia desde Sedimentador 2 hacia los humedales artificiales.	40
Figura 16 Disposición de los humedales artificiales, vegetación, sustrato y descarga final.	41
Figura 17 Disposición de ingreso – salida y muestreo en los humedales.	42
Figura 18 Diagrama de ubicación de los puntos de muestreo.	43
Figura 19 Análisis de la variación de Temperatura (°C) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	50
Figura 20 Análisis de la variación de Potencial de Hidrógenos (pH) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	51
Figura 21 Análisis de la variación de Conductividad Eléctrica (μS/cm) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	52
Figura 22 Análisis de la variación de Sólidos Totales Disueltos TDS (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	53
Figura 23 Análisis de la variación de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO5 (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	54
Figura 24 Análisis de la variación de Coliformes Fecales (NMP/100 ml) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	55
Figura 25 Análisis de la variación de Fosfatos (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	56
Figura 26 Análisis de la variación de Nitratos (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.	57

Resumen

El objetivo de la investigación fue Evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR “La Totora” – Ayacucho Perú. Con los avances de la Ingeniería Civil y Ambiental, los humedales artificiales son considerados tecnologías de tratamiento natural de aguas contaminadas, cuya función es la remoción de contaminantes; Para ello, se instalaron seis humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) rectangulares a escala de laboratorio a base de ladrillos y concreto simple, con dimensiones de 1.20 m de largo, 0.45 m de ancho y 0.45 m de profundidad y pendiente de 0.5%, con un área superficial útil de 0.54 m², como sustrato se utilizaron piedra de Ø 2” y grava de Ø ¼”, Ø ½”, Ø ¾”, sembrada con macrófitas *Typha angustifolia* “totora”. La investigación consistió en 05 etapas: El diseño, construcción, operación, monitoreo, toma de muestras y análisis de datos mediante la prueba Duncan. El caudal de entrada a los humedales fue de 18.76 L/día, un TRH de 4.23, 4.54 y 4.94 días. Se tomaron muestras a la salida del sedimentador integrado (Afluente) y salida de los humedales artificiales (Efluentes). Los análisis de los parámetros fueron tanto In Situ (Temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos) como en los laboratorios (DBO5, Coliformes fecales, Fosfatos y Nitratos). La remoción promedio en humedales con gravas de Ø ¼”, Ø ½”, Ø ¾” fueron de 4.76, 3.38%, 2.16% para temperatura respectivamente; 5.49, 4.85%, 3.33% para pH; 31.85%, 26.73%, 22.45% para conductividad eléctrica; 30.29%, 24.87%, 20.06% para sólidos disueltos totales; 86.53, 84.95, 82.76% para DBO5; 86.05%, 82.32%, 78.64% para coliformes fecales; 44.09%, 36.84%, 29.38% para fosfatos; 33.84%, 28.88%, 23.50% para fosfatos. Con los resultados de las medias porcentuales de remoción, deducimos que entre humedales con gravas de Ø ¼”, Ø ½”, Ø ¾” para algunos casos numéricamente son diferentes; pero estadísticamente no son significativas y viceversa. Entre el Afluente y los Efluentes los porcentajes de remoción son muy significativos para DBO5 y Coliformes fecales; mientras que no para temperatura y pH, intermedias para conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, fosfatos y nitratos El diámetro efectivo es factor importante para la porosidad del sustrato y el TRH. El tamaño de las partículas, los coeficientes de uniformidad y curvatura desempeñan un papel importante en la configuración de los poros del sustrato y la remoción de contaminantes.

Palabras clave: Granulometría del sustrato, remoción de contaminantes, humedales artificiales, aguas residuales.

Abstract

The objective of the research was to evaluate the effect of substrate granulometry on the removal of pollutants in artificial wetlands of horizontal subsurface flow in the Wastewater Treatment Plant (WWTP) "La Totorá" - Ayacucho Peru. With the advances in Civil Engineering and Environmental Engineering, artificial wetlands are considered natural treatment technologies for contaminated water, whose function is the removal of pollutants. Because of this, six horizontal artificial subsurface flow wetlands (HASSFW) laboratory-scale rectangular based on bricks and simple concrete were installed, with dimensions of 1.20 m long, 0.45 m wide and 0.45 m deep and a slope of 0.5%, with a useful surface area of 0.54 m². As substrate, Ø 2" stone and Ø ¼", Ø ½", Ø ¾" gravel were used, planted with *Typha angustifolia* "totorá" macrophytes. The research consisted of 05 stages: The design, construction, operation, monitoring, sampling and data analysis using the Duncan test. The inflow to the wetlands was 18.76 L/day, a HRT of 4.23, 4.54 and 4.94 days. Samples were taken at the outlet of the integrated settler (Influent) and outlet of the artificial wetlands (Effluent). Parameter analyses were performed both in situ (Temperature, pH, Electrical conductivity, Total dissolved solids) and in the laboratories (BOD₅, Fecal coliforms, Phosphates and Nitrates). The average removal in wetlands with Ø ¼", Ø ½", Ø ¾" gravels were 4.76, 3.38%, 2.16% for temperature respectively; 5.49%, 4.85%, 3.33% for pH; 31.85%, 26.73%, 22.45% for electrical conductivity; 30.29%, 24.87%, 20.06% for total dissolved solids; 86.53, 84.95, 82.76% for BOD₅; 86.05%, 82.32%, 78.64% for fecal coliforms; 44.09%, 36.84%, 29.38% for phosphates; 33.84%, 28.88%, 23.50% for phosphates. With the results of the removal percentage averages, we deduce that between wetlands with Ø ¼", Ø ½", Ø ¾" gravels for some cases numerically they are different; but statistically they are not significant and vice versa. Between Influent and Effluent the removal percentages are very significant for BOD₅ and fecal coliforms; while not for temperature and pH, intermediate for electrical conductivity, total dissolved solids, phosphates and nitrates. Effective diameter is important factor for substrate porosity and HRT. Particle size, uniformity and curvature coefficients play an important role in substrate pore configuration and contaminant removal.

Key words: *substrate grain size, pollutant removal, artificial wetlands, wastewater.*

Introducción

En el Perú se observa una tendencia creciente de la población y por ende el acceso a los servicios de saneamiento se ha incrementado, con mayor velocidad en el ámbito rural; a esto se suma la contaminación de los recursos hídricos tanto en zonas urbanas como rurales por la descarga de las aguas residuales sin un tratamiento eficiente, debido al desconocimiento de la operación y mantenimiento de los sistemas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, llegando así a contaminar los sistemas acuáticos y así mismo afectando la salud pública.

Los humedales artificiales son sistemas, donde su tecnología está diseñada y construida para mejorar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales cuando las aguas residuales interactúan con plantas, raíces, microorganismos y aire.. (Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2010, como se citó en Vera et al., 2016).

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están compuestos por: agua residual a tratar, sustrato o medio de soporte, plantas y microorganismos. Estos tipos de humedales pueden ser un método de tratamiento eficiente y rentable para una gran cantidad de aguas residuales, entre ellas las aguas residuales domésticas, las industriales y los lixiviados. Las aplicaciones van desde viviendas unifamiliares, parques y escuelas hasta instalaciones públicas e industriales (Asprilla et al., 2020a). Estos sistemas purifican el agua eliminando materia orgánica, oxidan el amonio, reducen nitratos y eliminan fósforo. Las operaciones son complejas e incluyen oxidación bacteriana, filtración, precipitación y precipitación química. (Cooper et al., 1996, como se citó en Delgadillo et al., 2010).

El presente trabajo de investigación como piloto se realizó con el fin de determinar si la granulometría del sustrato influye en la remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal (HAFSSH) y con cuál de los diámetros de grava es más efectiva dicha remoción; además, ver si la porosidad del material y el tiempo de retención hidráulica repercuten en la investigación. Tales interrogantes nos permitieron plantear el problema y los objetivos de la tesis. El interés de la investigación gira en torno a la problemática del agua, entre las que destacan la falta de abastecimiento, falta de acceso en cantidad y calidad, los altos índices de contaminación y la falta de tratamiento de las mismas. Estos problemas implican de manera muy importante en la subsistencia de los ecosistemas, en la salud pública de los habitantes y en las actividades productivas; la solución al tratamiento de aguas residuales son las Ecotecnologías como los humedales artificiales en tratamientos secundario o terciario y son una opción viable que tienen un alto potencial en la remoción o depuración de contaminantes que no requieren aditivos químicos. Es por ello, que en este trabajo de investigación se plantea el análisis experimental del tratamiento de aguas residuales después de un tratamiento secundario y

luego con humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal y ver que la calidad de agua sí la remoción de contaminantes es eficaz.

En el capítulo I, se plantea el problema principal de la investigación: ¿En qué medida, la granulometría del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal?, a partir de la descripción y delimitación. El capítulo contiene también la justificación e importancia, limitaciones y objetivos de la investigación. En el capítulo II, se señalan los antecedentes de la investigación, las bases teóricas de todo lo referente a humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y cómo influye la granulometría en la remoción de contaminantes de aguas residuales; además del marco conceptual. En el capítulo III, se consideró la metodología de la investigación, donde se justifica desde el enfoque, alcance y diseño la importancia del experimento. Se incluye también información de la población y muestra, las hipótesis y la operacionalización de variables, las técnicas e instrumentos para el procesamiento estadístico de la información. En el capítulo IV, se detallan los resultados. A partir de los resultados del análisis granulométrico y de aguas residuales del afluente (sedimentador integrado N° 02) y efluentes de humedales con gravas de $\varnothing \frac{1}{4}$ ", $\varnothing \frac{1}{2}$ ", $\varnothing \frac{3}{4}$ " se construyen tablas y gráficos para la contrastación de hipótesis, análisis e interpretación, destacándose aspectos importantes que contribuyeron a dar respuesta al problema y a los objetivos de la investigación. En el capítulo V, se detallan finalmente las conclusiones y recomendaciones que se pudieron obtener de la presente investigación.

Capítulo I

1. Planteamiento Del Problema

1.1. *Descripción Del Problema*

1.1.1. Problemática Mundial

El crecimiento de la población en el mundo cada vez aumenta y uno de los grandes desafíos es garantizar el acceso de toda la población a servicios de agua potable y saneamiento, a parte del crecimiento demográfico acelerado son las dificultades técnicas. Las consecuencias de un servicio de saneamiento deficiente son devastadoras para la salud pública, el desarrollo económico y la protección del medio ambiente. En la actualidad, la contaminación ambiental es un desafío global que ha ido en aumento durante décadas debido al crecimiento de la población mundial y a diversas actividades que contribuyen a estos daños. En este sentido, el sector de la construcción ha desempeñado un papel importante en esta problemática debido a la falta de tecnologías sostenibles que mitiguen su impacto.

La población humana y las fábricas producen cantidades de aguas residuales al día, que si no se recolectan y tratan adecuadamente, amenazan gravemente la salud humana y el ambiente. El aumento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento para una depuración eficiente, autónomo y económicamente viable, así como los humedales artificiales.

Los humedales artificiales, son tecnologías de purificación naturales que tratan eficazmente muchos tipos de agua contaminada. En comparación con otras tecnologías de tratamiento de agua, los humedales tienen bajos requisitos de operación y mantenimiento y son sostenibles en el sentido de que su operación es menos sensible a los cambios en las cargas de los afluentes y las concentraciones de contaminantes. Los humedales de tratamiento pueden tratar eficazmente aguas residuales crudas, primarias, secundarias, terciarias, etc (Dotro et al., 2017).

En las últimas décadas, los humedales de tratamiento han surgido como una tecnología confiable y eficiente para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. Su uso está extendido en varios países europeos y norteamericanos, principalmente donde se utiliza como tratamiento biológico secundario o terciario. En la mayoría de los países en desarrollo de América Latina, donde las condiciones climáticas son muy favorables, su uso es limitado. (Alarcón et al., 2018).

En determinadas regiones de Europa se han utilizado humedales contruidos desde hace más de cuarenta años para tratar las aguas residuales de pequeños municipios. Hoy en día, estos sistemas se utilizan cada vez más para tratar diversos tipos de aguas residuales,

incluidas aguas residuales municipales e industriales, escurrientías ácidas de minas, desechos agrícolas y ganaderos y lixiviados de vertederos. (Alarcón et al., 2018).

1.1.2. Problemática nacional

A partir de las proyecciones oficiales del INEI, se ha establecido la proyección de población por área de residencia. Se observa una tendencia creciente de la población total, que pasa de 31,2 millones en el año 2017 a 34,7 millones en el año 2026. De acuerdo con la información del Censo Nacional 2017, la población en el Perú ascendió ese año a 31 237 385 habitantes, de los cuales el 78,8 % residía en el área urbana y el 21,2 % en el área rural. A lo largo de los últimos años, a excepción del 2020, por efecto de la pandemia del coronavirus, el acceso a los servicios de saneamiento se ha incrementado, con mayor velocidad en el ámbito rural. En términos de brecha, aproximadamente 3 millones de peruanos no cuentan con acceso al servicio de agua potable, de los cuales el 49,5 % reside en el ámbito rural y en el ámbito urbano tiene la mayor cobertura (94,8 %); mientras que aproximadamente 7,5 millones de peruanos no cuentan con acceso al sistema de alcantarillado sanitario y disposición sanitaria de excretas y de ellos, el 63 % reside en el ámbito rural, siendo mayor la cobertura del servicio brindado en el ámbito urbano (89,2 %); mientras que en el ámbito rural (30,2 %). (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2023)

La normatividad peruana en el Art. 79 de la Ley N° 29338 exige que previamente al uso de efluentes domésticos cumplan el límite máximo permisible (LMP) y los estándares de calidad ambiental (ECA), según el fin de descarga o reúso.

Los Humedales artificiales se presentan como tecnologías promisorias para contribuir a resolver la falta de cobertura en saneamiento, especialmente en casos que incluyen la opción de reúso de efluentes o lodos tratados. Se ha observado, en eventos como la Conferencia Panamericana de Humedales, que el sector académico está consciente de este potencial, pero todavía falta difusión para su aplicación a escala, por ejemplo, en las empresas de agua y saneamiento. (Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), 2018).

1.1.3. Problemática regional

En la mayoría de los centros poblados de la región Ayacucho las aguas residuales domésticas no reciben el tratamiento adecuado, ya que en las zonas rurales las aguas servidas se eliminan a través de sanitarios, biodigestores y plantas de tratamiento de aguas residuales, permitiendo que los residuos domésticos circulen libremente en el ambiente, pastos, arroyos y otros cuerpos de agua (receptores). La brecha por falta de saneamiento en la región es amplia y requiere de atención con otras tecnologías de tratamiento que sean eficientes, económicos y ambientalmente factibles; para ello, como tratamiento secundario o terciario, los humedales artificiales de flujo subsuperficial serían una adecuada alternativa en las zonas rurales, a estos humedales se le puede considerar como reactores biológicos.

Una de estas tecnologías que datan de hace muchos años atrás son los humedales artificiales y se implementan para poblaciones pequeñas porque se requiere grandes áreas para su construcción. Como tratamiento secundario o terciario, los humedales de flujo subsuperficial horizontal serían una adecuada alternativa para el tratamiento de aguas residuales en las zonas rurales, ya que son soluciones integrales con adecuadas eficiencias y bajos costos para la remoción de contaminantes; además, que las aguas residuales al hacerlas circular a través de los humedales de flujo sub superficial, tienen lugar a procesos físicos, químicos y biológicos, que van reduciendo los contaminantes presentes. Importante incrementar y mejorar normas técnicas por medio del Ministerio de Vivienda Construcción y el Programa Nacional de Saneamiento Rural (PNSR) para tratamiento complementario de aguas residuales (uso de humedales artificiales).

Es por ello, que en este trabajo de investigación se plantea el análisis experimental del tratamiento de aguas residuales después de un pre y tratamiento primario o secundario y luego con humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal y evaluar el efecto en la remoción de contaminantes y que la calidad de agua cumple con los límites máximos permisibles (LMP) y los estándares de calidad ambiental (ECA).

1.2. Delimitación Del Problema

1.2.1. Espacial

El trabajo de investigación se desarrolló en:

- País: Perú
- Región: Ayacucho
- Provincia: Huamanga
- Distrito: Jesús Nazareno
- Lugar: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Tatora”
- Longitud: 74°12’30.016” O; (X=585802 m)
- Latitud: 13°08’30.16” S; (Y=8547058 m)
- Altitud: 2627 m.s.n.m.

Figura 1

Fotografía satelital, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totora”.



Fuente: Google heart.

Figura 2

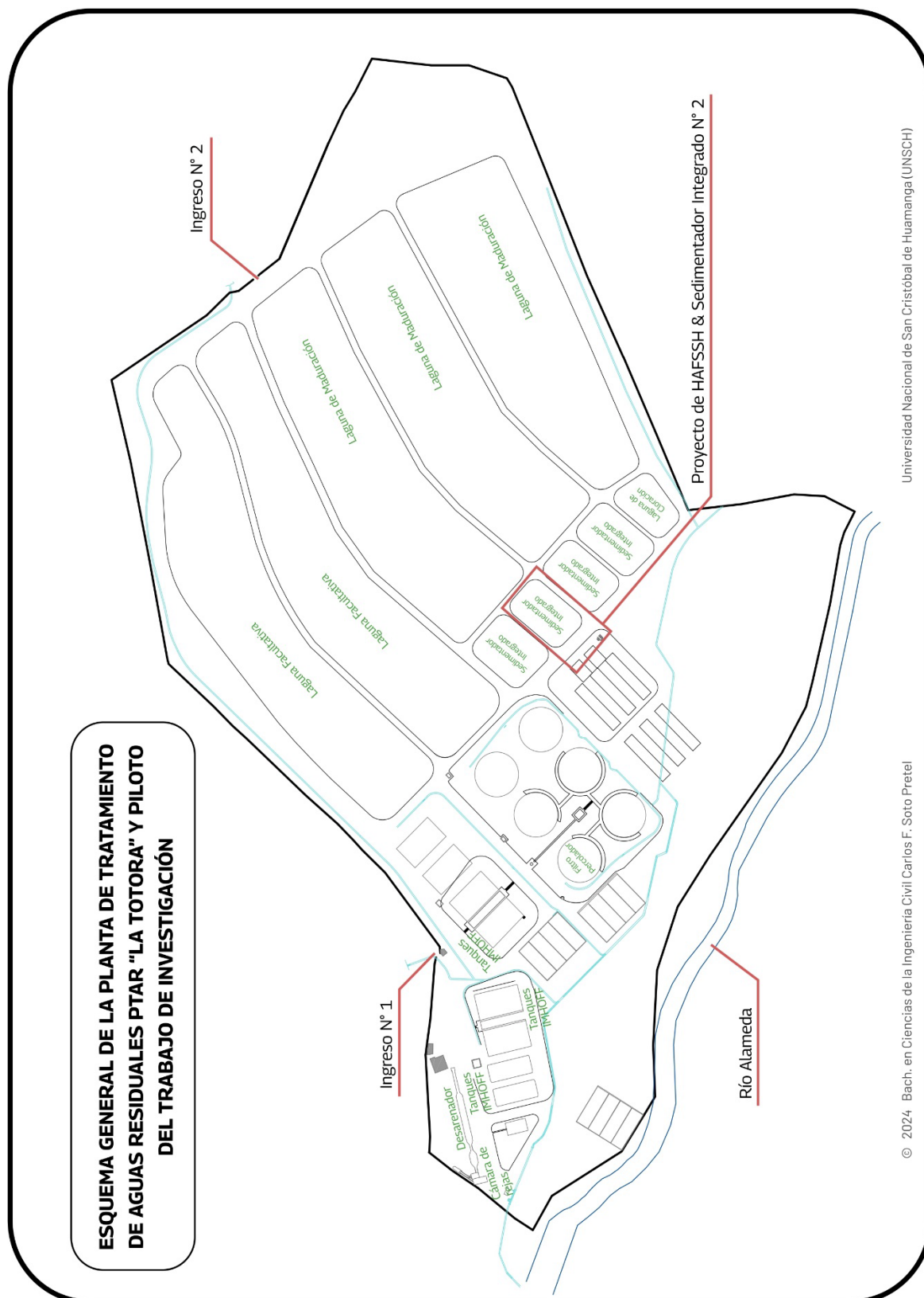
Zona de estudio, interior de la PTAR – sedimentadores, humedales artificiales.



Fuente: Propia.

Figura 3

Esquema general de la PTAR “la Totorá”, indica el lugar del proyecto de tesis.



Fuente: Elaboración propia.

1.2.2. Temporal

La presente investigación se realizó durante un periodo de 06 meses marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto del año 2023.

1.2.3. Temática y unidad de análisis

Temática. La investigación se enfocó en determinar el Efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en las aguas residuales de la PTAR “La Totorá” – Ayacucho 2023.

Unidad de análisis. Las aguas tratadas del sedimentador integrado N° 02 de la PTAR “La Totorá”, Jesús Nazareno.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿En qué medida, la granulometría del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?

1.3.2. Problemas específicos

¿En qué medida el coeficiente de uniformidad del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?

¿En qué medida el coeficiente de curvatura del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?

¿En qué medida el diámetro efectivo del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación teórica

Las aguas residuales domésticas son el producto final de las actividades diarias del ser humano, las cuales contienen gran cantidad de carga orgánica y través del tiempo se han experimentado diversas formas de tratar las aguas residuales domésticas mediante una serie de tratamientos que después del tratamiento primario se pueden realizar los secundarios por medio de los humedales artificiales; por tanto, en los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (sustrato), con una profundidad que depende del tamaño y alcance de las raíces de las plantas. La vegetación se siembra en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.(Comisión Nacional del Agua, 2015).

El humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal muestra una remoción efectiva en todos los parámetros analizados, alcanzando una eficiencia de demanda biológica de oxígeno (DBO) del 96%; 78% nitrógeno total; 88% del fósforo total; 96% de turbidez; 61% de oxígeno disuelto; 55% de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales; 100% coliformes

totales y fecales; También alcanza un pH neutro de 6,5, una temperatura de 28,2 °C y un olor aceptable; para obtener aguas residuales domésticas aptas para riego. Todo esto también dependerá de las condiciones geográficas, socioeconómicas, culturales y ambientales, demostrando que dichas aguas se encuentran dentro de lo establecido en los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua establecidas por el Ministerio del ambiente. (Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), 2018).

1.4.2. Justificación Práctica.

El presente trabajo de investigación contribuirá en determinar el efecto de la granulometría por medio del diámetro efectivo, los coeficientes de uniformidad y curvatura del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR “La Totorá”, antes de su descarga en un cuerpo receptor u otro uso. Con la construcción de éstos humedales artificiales a escala de laboratorio se podrá comparar los resultados y evidenciar el proceso de la remoción de contaminantes; además, determinar si es significativo la diferencia de remoción entre humedales (efluentes) y éste con lo del sedimentador integrado (afluente). El trabajo comprendió: el diseño del sistema, construcción, la adaptación de la especie, el monitoreo, operación y mantenimiento y el análisis final de las muestras de efluentes. La propuesta de la investigación fue con humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal (HAFSSH) a escala de laboratorio, con medio granular o sustrato de 1/4", 1/2" y 3/4" de diámetro, con especie macrófita emergente *Typha angustifolia* “totorá”, aguas residuales de la PTAR “La Totorá” desde el sedimentador N° 02.

1.4.3. Justificación Metodológica.

Durante el periodo de trabajo y por medio de un programa sistemático de operación, monitoreo y registros mensuales, se procedió a la toma de muestras de los efluentes o salidas de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal; del mismo modo se tomaron muestras del sedimentador integrado N° 02 (cantidad = 500 ml en frascos estériles y herméticos); También, se aforaron los caudales de salida de los efluentes en los HAFSSH, se realizaron los análisis granulométrico de las gravas de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾". Los parámetros analizados fueron tanto in situ (Temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos) y en los laboratorios (DBO5, Coliformes fecales, Fosfatos y Nitratos), estos análisis se desarrollaron en los laboratorios de la UNSCH y de la PTAR. A partir de éstos resultados se determinó si existe o no remoción de contaminantes y si influye o no la granulometría del sustrato en ello. Los resultados serán útiles en investigaciones posteriores.

1.4.4. Importancia.

A pesar de las extensas investigaciones realizadas en todo el mundo sobre los humedales artificiales que tratan aguas residuales de diversos orígenes, en el Perú y

específicamente en nuestra Región, aún se tiene información escasa sobre la remoción de los contaminantes en aguas residuales con éstos sistemas; además, de los factores de diseño, operación y granulometría del sustrato (medio filtrante) que interactúan en el tratamiento, a esto se suman especies vegetales, grupos microbianos, cargas hidráulicas y tiempos de residencia o retención hidráulica, etc. Por tanto, el objetivo de esta investigación es Evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la eliminación de contaminantes de aguas residuales domésticas en humedales artificiales con flujo subsuperficial horizontal.

1.5. Limitaciones de la investigación

La tecnología y la ingeniería avanzan a pasos agigantados en los países del mundo, y en América del Sur no es la excepción, en el Perú se ha realizado trabajos de investigación relacionados y pese a ello, existen limitaciones por la escasa difusión de estas tecnologías, su uso y su práctica. Igualmente la información local es escasa y existe poco interés en éstos temas. La presente investigación por su naturaleza debería de realizarse a escala real; pero se cuentan con una serie de limitaciones como: contar con amplias superficies de terreno, laboratorio bien implementado y el acceso a la información.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal, planta de tratamiento de aguas residuales PTAR “La Totorá”, Ayacucho 2023.

1.6.2. Objetivos específicos

Evaluar el efecto del coeficiente de uniformidad del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.

Evaluar el efecto del coeficiente de curvatura del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.

Evaluar el efecto de diámetro efectivo del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Investigaciones Internacionales

Barrera et al. (2003), Al estudiar el efecto de la distribución del tamaño de las partículas sobre la función de conductividad hidráulica de arena limpia, el grado de saturación parcial es un aspecto muy importante para entender este comportamiento. A partir de la determinación experimental de las curvas de retención de humedad, curvas de conductividad hidráulica en función del contenido volumétrico de agua y distribución del tamaño de poro, para tres arenas con diferentes distribuciones granulométricas, se determinó el efecto de la distribución granulométrica sobre la función de conductividad hidráulica. Los resultados muestran que el valor de la conductividad hidráulica es proporcional a la uniformidad del tamaño de partícula máximo y el tamaño de partícula más pequeño.

Los autores Xue et al. (2019), en su estudio, revisaron la literatura existente sobre el Efecto de la granulometría del sustrato en el rendimiento de los humedales construidos. Descubrieron que la granulometría del sustrato puede afectar la eficiencia de eliminación de contaminantes, y que los sustratos con una granulometría más fina tienen una mayor superficie específica, lo que puede mejorar la capacidad de retener y eliminar contaminantes. Sin embargo, también encontraron que los sustratos más finos pueden obstruirse más fácilmente y pueden ser más difíciles de mantener. Concluyeron que la granulometría del sustrato es un factor importante a considerar al diseñar y operar humedales construidos.

(Cubillos et al. 2014, como se citó en Rivas & Paredes (2014), Al investigar el efecto de la carga hidráulica y los filtros sobre la eficiencia de la eliminación de contaminantes en los humedales, demostraron que la arena como filtro tiene mejores resultados en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales domésticas y mejores resultados que la piedra triturada, ya que la arena mostró una mayor eliminación en ambos parámetros en el estudio. Los humedales mostraron una notable estabilidad en términos de concentraciones y cargas contaminantes de los efluentes, pues incluso cuando se aumentó la carga hidráulica en la segunda etapa, lograron suprimir dicho aumento y, por el contrario, aumentaron la remoción, excepto el nitrógeno.

Vymazal (2011), en su estudio, el autor revisó la literatura existente sobre el Uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. Descubrió que los humedales construidos son una tecnología efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, y que la granulometría del sustrato es uno de los factores que pueden afectar la eficiencia de eliminación de contaminantes. Concluyó que los humedales construidos son una

opción viable para el tratamiento de aguas residuales en áreas donde los sistemas de tratamiento convencionales no son prácticos o no están disponibles.

Wu et al. (2019), en su estudio, los autores revisaron la literatura existente sobre el rendimiento de los humedales construidos en el control de la contaminación del agua. Descubrieron que la granulometría del sustrato es un factor importante a considerar al diseñar y operar humedales construidos, y que los sustratos con granulometrías más finas pueden mejorar la eficiencia de eliminación de contaminantes. También encontraron que otros factores, como la carga hidráulica, la tasa de flujo y la selección de plantas, pueden afectar el rendimiento de los humedales construidos. Concluyeron que los humedales construidos son una tecnología efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales y el control de la contaminación del agua.

He et al. (2020), en este estudio, los autores investigaron la influencia del tamaño del sustrato y el tiempo de retención hidráulica en la eliminación de nitrógeno y fósforo en humedales construidos. Descubrieron que la granulometría del sustrato y el tiempo de retención hidráulica afectaron significativamente la eliminación de nitrógeno y fósforo, y que los sustratos con granulometrías más finas y tiempos de retención hidráulica más largos tuvieron una mayor eficiencia de eliminación de nitrógeno y fósforo. Concluyeron que la granulometría del sustrato y el tiempo de retención hidráulica son factores importantes a considerar en el diseño y la operación de humedales construidos para la eliminación de nitrógeno y fósforo en aguas residuales.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Universidad Nacional Agraria La Molina (2018), en su IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. UNALM. Suero, D. Pastor, P. Miglio, R. Saca, M. en la investigación “Humedales construidos para el saneamiento en la comunidad campesina de Haparquilla, Cusco”, mencionan que los humedales construidos brindan la oportunidad de incorporar las tecnologías de saneamiento al paisaje de la comunidad en vez de ser un elemento que lo perturbe. De esta misma forma el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas permite el mejoramiento del espacio público a través de su uso en el riego de ornamentales y especies forestales. De esta investigación se obtuvo resultados en la calidad de agua residual en la entrada y salida del humedal horizontal con clara remoción de contaminantes.

Flores (2014), Concluye que los análisis físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales durante los cuatro meses en que se realizó el estudio se encuentran por debajo de los valores correspondientes a los estándares peruanos (LMP), por lo que estos sistemas se pueden utilizar como tratamientos avanzados en localidades pequeñas; siempre, teniendo en cuenta las dimensiones hidráulicas y los datos técnicos.

Mamani (2018), el estudio demostró que el humedal construido con grava como sustrato fue eficiente en la remoción de hierro y manganeso en agua subterránea. Además, la granulometría del sustrato influyó en la eficiencia de remoción de los contaminantes.

A. Barrera & Osorio (2017), indican que el humedal construido con grava como sustrato logró una alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales de la industria láctea. La granulometría del sustrato fue un factor importante en la eficiencia del sistema.

Cieza & Gutiérrez (2016), el humedal construido con grava y arena como sustrato fue eficiente en la remoción de coliformes totales y fecales en aguas residuales domésticas. La granulometría del sustrato y la carga orgánica influenciaron en la eficiencia del sistema.

Chávez & García (2016), el humedal construido con zeolita como sustrato demostró ser eficiente en la remoción de arsénico en agua. La granulometría del sustrato influyó en la eficiencia del sistema.

Santos & Castillo (2015), el humedal construido con diferentes tipos de sustrato (gravas de diferentes tamaños y materia orgánica) logró una alta eficiencia en la remoción de contaminantes en aguas residuales. La granulometría del sustrato influyó en la eficiencia del sistema, siendo la gravilla más gruesa la que demostró mejores resultados.

Tavera & Rivas (2014), el humedal construido con grava y arena como sustrato demostró ser eficiente en la remoción de contaminantes en aguas residuales de una urbanización en Lima. La granulometría del sustrato y la carga orgánica influenciaron en la eficiencia del sistema.

Vela (2018), señala en las conclusiones de su investigación que el sistema está integrado en dos escalas de prueba: el tanque Imhoff y el humedal; Por su alta eficiencia, bajo costo, facilidad de uso y mantenimiento, son adecuados para zonas rurales sin redes públicas de alcantarillado. La caracterización final de las aguas residuales municipales fue efectiva.

(Lapa, 2014), para el tratamiento de aguas residuales se diseñó un sistema de humedal artificial de flujo horizontal, que incluye pretratamientos (cámara de rejilla y desarenador), tratamiento primario (tanque Imhoff) y pos tratamiento (humedal artificial) y lecho de secado. Los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las aguas residuales fueron determinados en laboratorio, cuya aceptación de los resultados se logró de acuerdo con la norma nacional.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Las aguas residuales

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014), son aguas cuyas características originales han cambiado debido a la actividad humana y que, por su calidad, requieren un tratamiento previo antes de ser reutilizadas, vertidas a cuerpos de agua naturales o alcantarillas.

Según Vela (2018), las aguas residuales municipales son agua de viviendas, oficinas y edificios comerciales que se canaliza colectivamente a través de una alcantarilla subterránea hasta una laguna de estabilización, generalmente lejos de la ciudad. El agua producida durante el uso doméstico o industrial se denomina agua residual; también se le llama aguas residuales o aguas negras.

Las aguas residuales, también conocidas como cloacas, excrementos o aguas servidas, provienen de un suministro de agua residencial que ha sido utilizada para una variedad de funciones y usos requeridos por los residentes; De manera similar, se las conoce como aguas residuales, considerando sus fuentes, como la combinación de desechos líquidos y agua extraída de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, que pueden incluir aguas superficiales, aguas subterráneas o aguas pluviales. (Metcalf & Eddy, 1995)

Parte del agua vertida a la red de alcantarillado se dirige a plantas depuradoras que son tratadas mediante diferentes tecnologías, por ejemplo lagunas facultativas, lodos activados o filtros percoladores, etc. Posteriormente, estas aguas depuradas se utilizan para riego de cultivos, zonas verdes, piscicultura o se vierten a cuerpos de agua naturales. Las aguas residuales vertidas al sistema de alcantarillado que no se vierten a una planta de tratamiento de aguas residuales, se vierten a cuerpos de agua naturales, a terrenos baldíos o se utilizan en actividades inadecuadas como el riego, lo que supone un riesgo para la salud. (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2014).

Las aguas residuales provienen de tres fuentes principales: a) desechos domésticos líquidos (incluidos desechos residenciales, institucionales y comerciales); b) infiltración y agua de lluvia; c) residuos industriales líquidos. La actividad de tratamiento consta de tres partes: recolección, tratamiento y eliminación; El tratamiento de estas se realiza en una instalación física denominada “planta de tratamiento”, que constituye el eje central de mejora de la calidad del agua y por tanto el factor que controla la calidad de dichas aguas residuales para su eliminación o reutilización. (Vera et al., 2016).

2.2.2. Clasificación de las aguas residuales

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014), las aguas residuales se clasifican de la siguiente manera:

Aguas residuales industriales.- Son aquellas resultantes del desarrollo de procesos productivos, incluyendo, entre otros, las aguas residuales provenientes de la minería, la agricultura, la energía y la agroindustria.

Aguas residuales domésticas.- Se trata de aguas residuales de origen residencial y comercial, que contienen, ejemplo: residuos fisiológicos de la actividad humana y deben eliminarse adecuadamente.

Aguas residuales municipales.- Son aguas residuales domésticas mezcladas con aguas pluviales o industriales pretratadas, que se vierten en redes combinadas de alcantarillado.

2.2.3. Características de las aguas residuales

Según Metcalf & Eddy (1995), Las aguas residuales domésticas no son tan complejas como las aguas residuales industriales, que contienen compuestos tóxicos y peligrosos como fenoles y sustancias orgánicas tóxicas; Así, según sus características, las aguas residuales se pueden dividir en físicas, químicas y biológicas, según la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de los parámetros del agua residual.

Clase	Parámetros
Físico	Sólidos totales
	Sólidos totales en suspensión
	Temperatura
	Color
	Olor
	Turbiedad
	Densidad
Químico	Hidratos de Carbono
	Proteínas
	Lípidos
	Grasas, aceite
	DBO5, DQO, COT
	Alcalinidad
	Arena
	Metales Pesados
	Nutrientes N, P
	Cloruros
	Azufre
	Sulfuro de hidrógeno
	Gases
Biológico	Bacterias
	Algas
	Protozoos
	Virus, Coliformes

Fuente: Metcalf & Eddy, (1995).

2.2.4. Etapas de tratamiento de las aguas residuales

Dirigir las aguas residuales a cuerpos de agua naturales (arroyos, ríos, humedales) es una práctica ancestral que surge de la necesidad de evacuar el agua en cuestión fuera de los centros urbanos. El impacto ambiental que provoca este tipo de emisiones nos ha hecho creer que es necesario un tratamiento previo, especialmente en centros urbanos con gran población. (Fernández et al., 2001).

Según Crites & Tchobanoglous (2000), los niveles de tratamiento de aguas residuales se clasifican en:

Pretratamiento: El propósito es asegurar que las aguas residuales no se estanquen y puedan pasar libremente a través de la cámara de rejilla (separación de partículas grandes) y la trampa de arena (elimina la arena de las aguas residuales).

Tratamientos: Durante el primer tratamiento se encargan de retirar las materias en suspensión del agua residual. Durante el tratamiento primario encontramos las siguientes unidades: tanques sedimentadores y sépticos, tanques Imhoff, lagunas de estabilización de fase anaeróbica. En el tratamiento secundario se busca lograr la descomposición del contenido biológico de las aguas residuales (derivadas de desechos humanos) y la satisfacción de la demanda de oxígeno. Entre las unidades del proceso de descomposición tenemos lagunas de estabilización, humedales artificiales, lodos activados. En el terciario, tiene como finalidad reducir la carga residual de "nutrientes, metales pesados, detergentes u otras sustancias tóxicas" después del tratamiento secundario. Contamos con una serie de componentes como: Humedales artificiales, filtración, absorción y otros. Finalmente el tratamiento Avanzado o de desinfección, los organismos patógenos deben eliminarse mediante cloración. Tenemos: "Campos de secado, lodos".

2.2.5. Los humedales artificiales.

Según Kadlec & Knight (1996), Los humedales reciben varios nombres en español, como humedales construidos, humedales creados, humedales artificiales, pantanos artificiales, lechos de plantas, lechos de hidrófitas, filtro de plantas, lechos de raíces.

Los humedales de tratamiento, también conocidos como humedales artificiales, son sistemas de tratamiento de agua diseñados específicamente para separar los contaminantes de las aguas residuales y proporcionar un tratamiento y eliminación adecuados de los desechos. A diferencia de los humedales naturales (pantanos, ciénagas, marismas, etc.) que son tratados como parte del medio huésped y no como parte del sistema de tratamiento. (Alarcón et al., 2018).

Los humedales artificiales se utilizan para eliminar la materia orgánica, los sólidos suspendidos, los nutrientes y algunos metales como hierro, plomo y cadmio del agua residual y, recientemente, contaminantes orgánicos persistentes. (Vymazal & Kröpfelová, 2008)

Según Delgadillo et al. (2010), Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

Los humedales son tecnologías de tratamiento natural que tratan eficazmente muchos tipos de agua contaminada. Se trata de sistemas diseñados para optimizar los procesos que ocurren en la naturaleza, por lo que se consideran opciones de tratamiento respetuosas con el medio ambiente y sostenibles. En comparación con otras tecnologías de tratamiento de agua, los depuradores tienen bajos requisitos de operación y mantenimiento y son sustentables en el sentido de que su desempeño es menos sensible a los cambios en la carga y la concentración de contaminantes en el afluyente. (Dotro et al., 2017).

El medio granular o sustrato influyen en el movimiento del agua en los humedales artificiales y en el crecimiento de las plantas. Proporcionan el área superficial para que los microorganismos se adhieran y actúen como medio de filtración y/o adsorción de contaminantes formando una biopelícula. Además, brindan apoyo a las raíces de las plantas; por tanto, los sustratos juegan un papel importante en la eliminación de contaminantes ya que la mayoría de las reacciones físicas, químicas y biológicas ocurren en los lechos de los humedales artificiales. (Pérez et al., 2022).

Según (Vidal & Hormazábal, 2018), los humedales artificiales son una de las tecnologías no convencionales más populares y reconocidas para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. El mecanismo de remoción de estos sistemas se produce a través del metabolismo de las plantas y del consorcio bacteriano de sus raíces (rizomas). Las interacciones físicas, químicas y biológicas de sus componentes (agua, vegetación, suelo y microorganismos) permiten reducir la concentración de sustancias orgánicas, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y sustancias tóxicas en diversas aguas residuales.

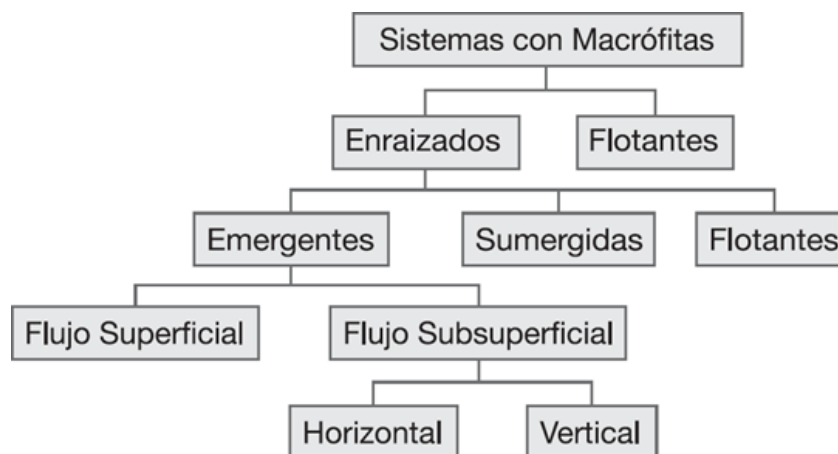
Según (Delgadillo et al., 2010), los humedales tienen tres funciones principales que los convierten en opciones atractivas para el tratamiento de aguas residuales: unen físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y a la materia orgánica, utilizan y convierten elementos con microorganismos y logran un tratamiento consistente con bajo consumo de energía y mínimo mantenimiento.

2.2.6. Clasificación de humedales artificiales.

Según Delgadillo et al. (2010), los humedales artificiales se pueden clasificar según el tipo de macrófitas que utilizan en sus actividades: macrófitas adheridos al sustrato (raíces) o macrófitas flotantes. Los humedales basados en macrófitas de raíces ascendentes pueden ser de dos tipos, dependiendo del ciclo del agua utilizado: 1) humedales de flujo superficial, donde el agua circula superficialmente entre los tallos de las macrófitas, y 2) humedales de flujo subsuperficial, donde el agua fluye por debajo de la superficie del humedal.

Figura 4

Clasificación de los humedales artificiales con macrófitas.

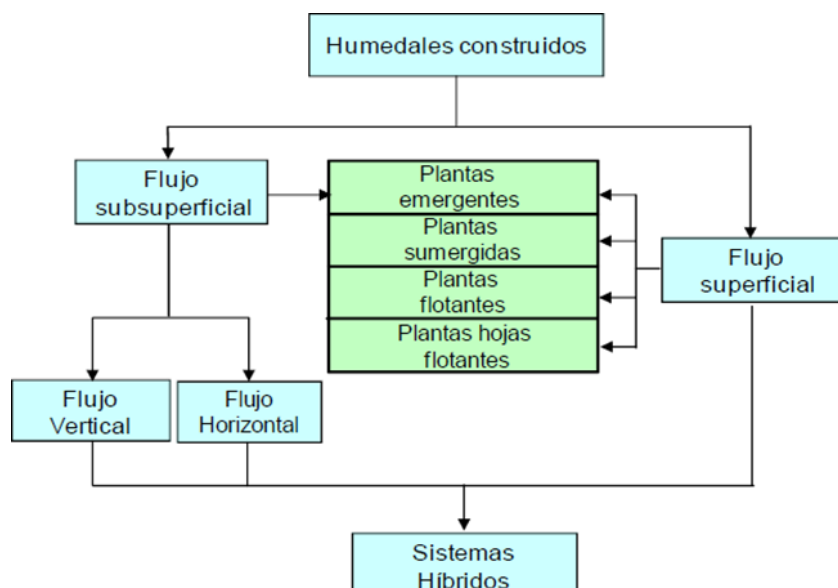


Fuente: (Delgadillo et al., 2010).

De ello todo, son probables las combinaciones y formar sistemas híbridos:

Figura 5

Clasificación de los humedales artificiales según flujo hidráulico.



Fuente: adaptado de Vymazal & Kröpfelová (2008)

Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS).

Aquí es donde el agua circula preferentemente por los tallos de las plantas y entra en contacto directo con la atmósfera. Este tipo de humedal es una variación del sistema lagunar convencional. A diferencia de ellos, son más bajos (hasta 0,6 m) y con plantas. Para terreno, este sistema es muy recomendable por su capacidad. (Delgadillo et al., 2010).

Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS).

Se caracterizan por el hecho de que la circulación del agua en ellos se produce a través de un medio granular, cuya profundidad de agua es de casi 0,6 m. En este ambiente granular se planta la vegetación y el agua entra en contacto con las raíces de las plantas. Dependiendo de la forma en que se aplica el agua al sistema, éste se divide en: humedales con flujo subsuperficial horizontal y vertical. (Delgadillo et al., 2010).

Humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal (HAFSSH).

Suele estar formado por tierra, arena y grava plantada con macrófitas acuáticos. La cama está recubierta con una película impermeable. El agua entra continuamente y se alimenta desde arriba en un extremo y se recoge a través de una salida en el fondo opuesto. Las aguas residuales se tratan cuando fluyen lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 - 1 m y su pendiente es del 0,5 - 1%. Las aguas residuales no ingresan directamente al medio granular principal (cuerpo), pero generalmente hay una zona de amortiguamiento formada por grava más grande. El diámetro de la grava de entrada y salida varía de 50 mm a 100 mm. La zona de plantación se compone de grava fina con un diámetro de 3 - 32 mm. Es importante que el agua residual que ingresa al sistema permanezca por debajo de la superficie (5 - 10 cm), lo que se logra ajustando el nivel del dispositivo de extracción de acuerdo con este requisito. (Delgadillo et al., 2010).

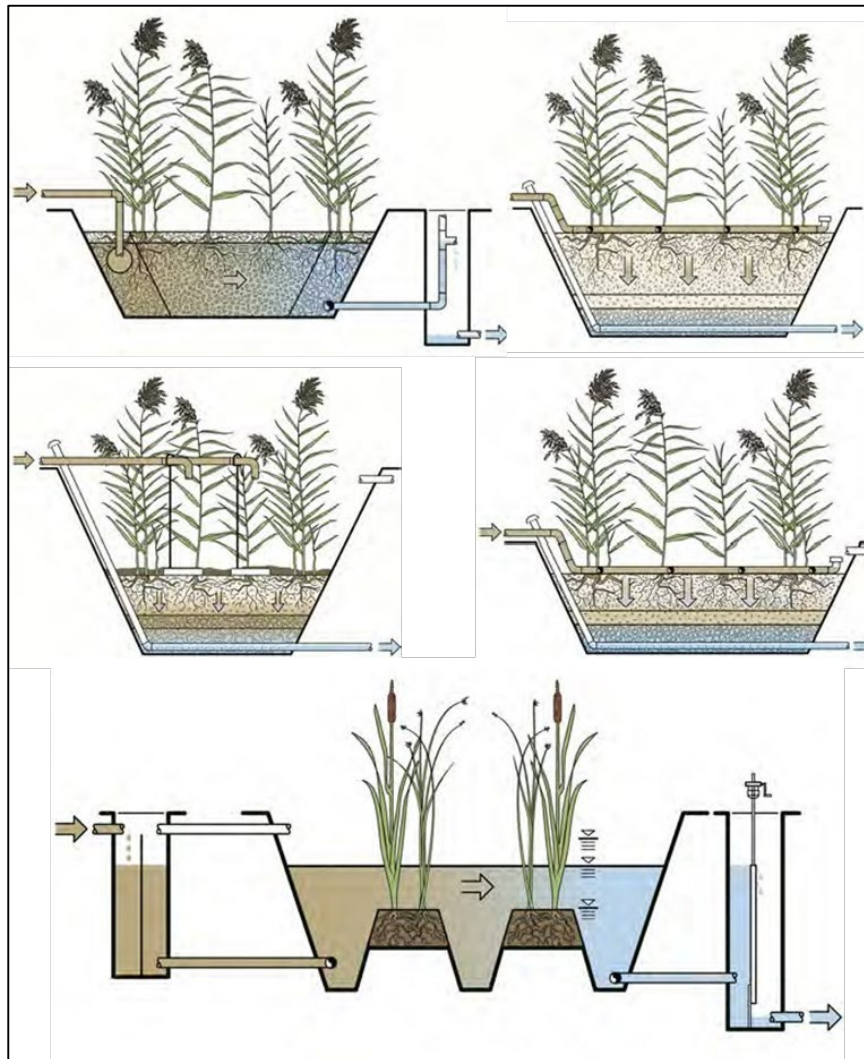
Humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical (HAFSSV).

Se les carga periódicamente. Así, a las condiciones de saturación de agua en la capa matriz les siguen períodos de sedimentación que estimulan el suministro de oxígeno. Hay muchas formas de variar la distribución de intervalos, el lecho de la matriz, etc., y los resultados obtenidos son prometedores. Este tipo de humedal, también conocido como filtros intermitentes, toma las aguas residuales de arriba hacia abajo a través de un sistema de tuberías. El agua penetra verticalmente a través del sustrato inerte (arena, grava) y se acumula en la red de drenaje del fondo del humedal. Se utiliza agua periódicamente para mantener y estimular las condiciones aeróbicas tanto como sea posible. También se planta vegetación emergente en este medio granular. (Delgadillo et al., 2010).

Los humedales artificiales pueden subdividirse en sistemas de flujo superficial y flujo subsuperficial; los de flujo subsuperficial se subdividen horizontal y vertical. Los humedales de flujo libre o superficial. (Dotro et al., 2017).

Figura 6

Esquema general de los humedales de tratamiento.



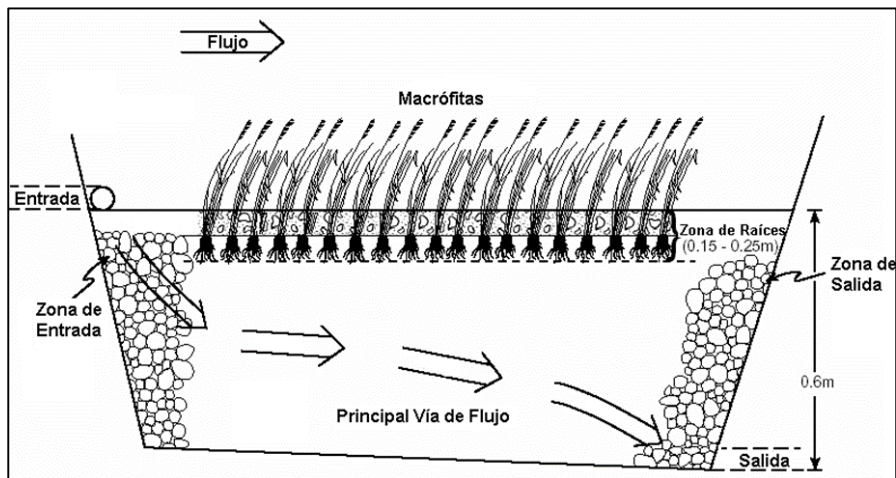
Fuente: (Dotro et al., 2017).

Arriba a la izquierda: flujo horizontal; arriba a la derecha: flujo vertical; centro izquierda: flujo vertical tipo francés, primera etapa; centro derecha: flujo vertical tipo francés, segunda etapa; fondo: superficie libre de agua.

Los HAFSSH se caracteriza por operar en flujo continuo, lo que favorece las condiciones anaeróbicas; que las aguas residuales ingresan constantemente por igual, circulan horizontalmente por el sustrato granular, rizomas y raíces de las plantas, donde la materia orgánica se descompone biológicamente, en este caso se produce el proceso de desnitrificación; Los microorganismos también adhieren fósforo y metales pesados a la capa filtrante. (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018).

Figura 7

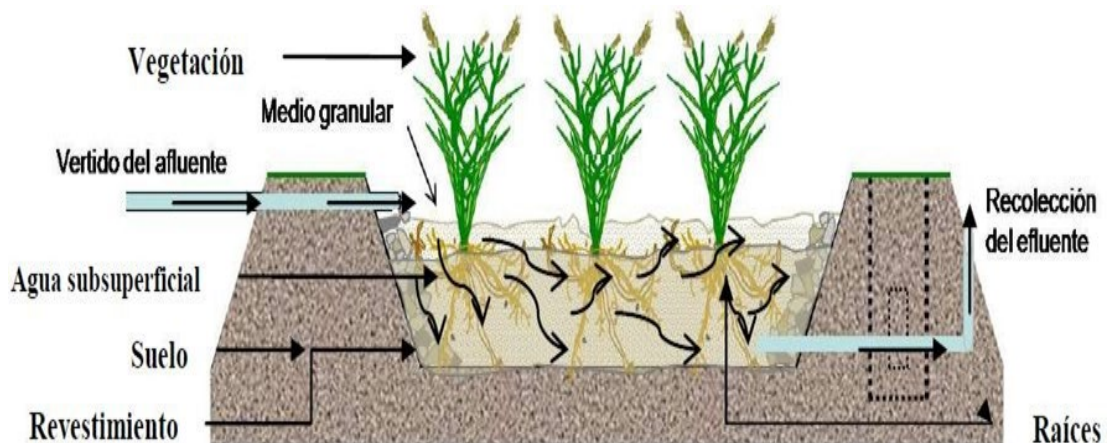
Esquema de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.



Fuente: (Agencia de Protección Ambiental (EPA), 2000)

Figura 8

Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH).



Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008 citado por Rabat, 2016)

2.2.7. Criterios de Diseño

Requisitos previos; según el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, (2018), Para un Humedal, se debe considerar lo siguiente:

- Debe considerarse las aguas grises provenientes de la ducha y lavadero multiusos, en ningún caso se permite el ingreso de aguas negras o provenientes de un inodoro.
- Si se produce gran cantidad de grasas, en la preparación de alimentos debe considerarse la instalación de una trampa de grasas a la salida del lavadero multiusos y previo al ingreso al Humedal.

- Incluir capacitaciones orientadas a las buenas prácticas de higiene y limpieza, donde se priorice el adecuado lavado de utensilios, eliminando residuos de comida, para evitar que ellos puedan llegar al Humedal.
- El lugar del Humedal debe ser, la que permita que las aguas grises ingresen por gravedad y bajo las mismas condiciones, el efluente para su aprovechamiento posterior, evitar en uso energía eléctrica.
- Los alrededores del Humedal debe ser protegida y evitar que otros líquidos ingresen al medio filtrante de tal forma que saturen el medio.

Beneficios; según el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, (2018)

- No hay olor, los gases producidos en la parte anaeróbica (CH_4 metano, H_2S sulfuro de hidrógeno) se oxidan y se liberan a la atmósfera en formas químicas inodoras.
- No se producen lodos. El efecto de cribado lo proporcionan las raíces. Debido a las condiciones de oxígeno del filtro, el lodo que queda en las raíces se oxida lentamente y la parte decantada llega a condiciones de pobreza de oxígeno. Las moléculas complejas se descomponen en otras más simples y llegan a la zona de oxígeno de las raíces, donde son tamizadas y oxigenadas.
- Eliminación de nutrientes vegetales, ya sea por absorción de las plantas o por ciclos anaeróbicos y aeróbicos de bacterias.
- Acumulación de metales pesados. La parte aérea de las plantas, sacándolas de la línea de agua.
- Eliminación de microorganismos patógenos: a razón de 4 unidades logarítmicas gracias a ácidos que favorecen la presencia de bacteriófagos.
- Eliminación de partículas coloidales: las cargas electrostáticas las atraen y se adhieren al sistema radicular.
- La interacción de los sustratos que se produce de forma natural debido a la convección. La recirculación potencia esta convección, facilitando el proceso de nitrificación y desnitrificación y eliminar nutrientes evitando la eutrofización.

2.2.8. Mecanismos en la remoción de contaminantes en humedales artificiales.

La remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas tratada en humedales artificiales requiere de diversos procesos fisicoquímicos y biológicos. (Dotro et al., 2017).

Tabla 2

Principales mecanismos para la eliminación de contaminantes y patógenos en humedales para tratamiento

Parámetro	Mecanismo de eliminación principal
Sólidos suspendidos	Sedimentación, filtración
Materia orgánica	Sedimentación y filtración para la eliminación de materia orgánica particulada, degradación biológica (aerobia y/o anaerobia) para la eliminación de materia orgánica disuelta
Nitrógeno	Amonificación y posterior nitrificación y desnitrificación, asimilación por la vegetación y exportación mediante la recolección de biomasa
Fósforo	Reacciones de adsorción-precipitación impulsadas por propiedades del medio filtrante, asimilación por vegetación y exportación mediante la recolección de biomasa
Patógenos	Sedimentación, filtración, muerte natural, depredación (realizada por protozoos y metazoos)

Fuente: (Dotro et al., 2017).

Tabla 3

Eficiencias de eliminación típicas de los principales tipos de humedales para tratamiento.

Parámetro	FH	FV	FV tipo francés	FS
Etapas de tratamiento (aplicación principal)	Secundario	Secundario	Combinado primario y secundario	Terciario
Sólidos suspendidos totales	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Materia orgánica (medido como demanda de oxígeno)	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno amoniacal	20 – 30%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno Total	30 – 50%	< 20%	< 20%	30 – 50%
Fósforo total (a largo plazo)	10 – 20%	10 – 20%	10 – 20%	10 – 20%
Coliformes	2 log10	2 – 4 log10	1 – 3 log10	1 log10

Fuente: (Dotro et al., 2017).

FH: flujo horizontal; FV: flujo vertical; FS: flujo superficial.

2.2.9. Partes de los humedales de flujo subsuperficial

Según lo indicado por Delgadillo et al. (2010), Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están conformados principalmente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

Agua residual.

Son aguas con impurezas y provienen de vertidos de diferentes orígenes, domésticos e industriales, luego son recogidas por una red de alcantarillado, para luego ser conducido a un humedal. Estas aguas proceden de una combinación de residuos líquidos y sólidos de apartamentos, oficinas, edificios comerciales y fábricas, así como de residuos industriales, agrícolas, superficiales o de lluvia. La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial porque integra todas las funciones del humedal y porque a menudo es el principal determinante de su éxito o fracaso por las siguientes razones:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener grandes efectos sobre los humedales y la eficiencia del tratamiento.
- Debido a la superficie y la poca profundidad del agua, el sistema interactúa fuertemente con la atmósfera a través de la precipitación y la evaporación (pérdida uniforme de agua debido a la evaporación del suelo y de las plantas).
- La densidad de la vegetación de los humedales afecta fuertemente su hidrología al bloquear las vías de flujo, haciendo que el movimiento del agua sea tortuoso a través de la red de raíces y rizomas, y evitando la exposición al viento y al sol.

Sustrato o medio granular.

En los humedales, el medio granular está formado por suelo: arena, grava, piedra, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal como consecuencia del crecimiento biológico. La principal característica del medio es que su permeabilidad debe ser suficiente para que el agua pueda atravesarlo. Para ello es necesario utilizar tierra granulada, principalmente grava seleccionada con un diámetro de unos 5 mm y una pequeña cantidad de finos. El sustrato, los sedimentos y los restos de vegetación de los humedales artificiales son importantes por varias razones:

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

vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

El sustrato es responsable de la eliminación de ciertos contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por tanto al flujo de agua tratada. El sustrato se compone de grava o arena, la capacidad de adsorción y la eficiencia de filtración del medio disminuye, pero aumenta la conductividad del agua. Indirectamente, los medios granulares contribuyen a la eliminación de contaminantes al apoyar el crecimiento de plantas y microorganismos que realizan actividades biodegradables.

Vegetación.

La vegetación en los humedales está definido básicamente por raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, lo que significa que recolectan energía solar para convertir carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la capacidad de transportar oxígeno desde la atmósfera a través de las hojas y tallos hasta donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea zonas aeróbicas donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de descomposición y nitrificación. La vegetación participa en el tratamiento de aguas residuales y escurrientías de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan el flujo de corriente.
- Provocan bajas velocidades del agua y permiten que los materiales en suspensión se sedimenten.
- Toman carbono, nutrientes y oligoelementos y los combinan con los tejidos vegetales.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- La eliminación de oxígeno en las planta, oxigena otras zonas del sustrato.
- El tallo y las raíces forman lugares para adherirse a los microorganismos.

Microorganismos

Los microorganismos aeróbicos se forman en la zona superior del humedal, donde domina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno de la atmósfera. El resto de la capa de grano está dominado por microorganismos anaeróbicos. Los procesos más importantes de los microorganismos son la descomposición de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y oligoelementos y la desinfección; Asimismo, los microorganismos más importantes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoos. La biomasa microbiana consume una gran proporción de carbono y muchos nutrientes. La tarea de la actividad microbiana es convertir una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inofensivas e insolubles y cambiar las condiciones

potenciales de reducción y oxidación del sustrato, lo que afecta la capacidad de procesamiento del humedal. Además, debido a la actividad biológica, muchos contaminantes se convierten en gases que se liberan a la atmósfera.

2.2.10. Enfoque y aplicación de humedales de Flujo Horizontal - HAFSSH

La configuración de humedales de flujo horizontal comenzó con un trabajo pionero en Alemania a finales de los años 1960. Suele tener como base grava o arena y el agua fluye a través del medio poroso. En un humedal de flujo horizontal, el lecho de grava opera bajo flujo saturado y está plantado con macrófitas emergentes. El agua ingresa al sistema de tratamiento por un extremo, fluye a través del medio de grava sin contacto con la atmósfera y se recolecta en el lado opuesto del lecho para su descarga final. Un tubo vertical instalado en el extremo e independiente del fondo del humedal regula el nivel del agua en el entorno de grava (Dotro et al., 2017).

En el pos tratamiento de aguas residuales con HAFSSH, la profundidad de la capa de grava suele ser de 0,5 - 0,7 m y el nivel del agua se mantiene a 5 - 10 cm por debajo de la superficie. En estos humedales, la vía de eliminación microbiológica dominante es la anaeróbica. Cuando se utilizan para el tratamiento secundario de aguas residuales municipales, generalmente son capaces de eliminar DBO5 y SST a valores aceptables, pero el rendimiento de los sistemas individuales depende en gran medida de la concentración del afluente y el tiempo de retención hidráulica. La eliminación completa de nitrógeno está limitada por las condiciones del lecho anaeróbico, que limitan la nitrificación; Sin embargo, si hay suficiente nitrato y carbono en la columna de agua, los humedales pueden ser muy eficaces para desnitrificar; El fósforo no se elimina de forma sostenible en el tiempo. Los HAFSSH se puede dimensionar usando requisitos de superficie simples ($\text{m}^2/\text{hab-eq}$), cargas máximas por área (por ejemplo, $\text{gBOD5}/\text{m}^2\text{d}$), relación longitud: ancho o por métodos más complejos y modernos. (Dotro et al., 2017).

2.2.11. Características del sustrato como medio granular.

Granulometría del sustrato.

La granulometría del sustrato se refiere a la distribución de los tamaños de partículas en un material sólido. En el contexto de los humedales de flujo sub-superficial horizontal, la granulometría del sustrato juega un papel importante en la remoción de contaminantes.

La granulometría se refiere a la distribución de tamaño de partícula de un sustrato (Ortiz, 2018). Dentro del ámbito de eliminar sustancias contaminantes en humedales con flujo subsuperficial horizontal, la variación en el tamaño de las partículas puede tener un impacto en la capacidad de porosidad y permeabilidad del lecho del humedal. Esto, a su vez, podría incidir en la eficacia del humedal para eliminar los contaminantes. (Guo et al., 2020).

Según Bolaños et al. (2019), los autores indican que las partículas más pequeñas presentes en el sustrato pueden obstaculizar el flujo de agua y disminuir la eficacia en la eliminación de contaminantes. En contraste, las partículas de mayor tamaño podrían no retener los contaminantes durante el tiempo necesario para su eliminación.

Además, según (Wang et al., 2018), la composición granulométrica del lecho también puede tener repercusiones en la variedad y cantidad de poblaciones microbianas presentes en los humedales. Los investigadores descubrieron que los humedales que cuentan con sustratos de partículas más pequeñas albergan una mayor diversidad de microorganismos y una población bacteriana más abundante en comparación con los humedales que poseen sustratos de mayor tamaño.

El coeficiente de uniformidad (CU)

Definido originalmente por Allen Hazen, utilizado para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas del suelo y se expresa: D_{60}/D_{10} , donde: D_{60} = el diámetro o tamaño por debajo del cual cae el 60% de la masa del suelo; y D_{10} = diámetro o tamaño por debajo del cual cae el 10% de la masa del suelo.

El coeficiente de curvatura (Cc)

Indica una curvatura granulométrica constante, sin escalones, en la mayoría de casos esto se cumpla para arenas como para gravas. El $C_c = ((D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}))$ y mide el grado de curvatura de la granulometría.

El diámetro efectivo (De)

Es el tamaño de partícula de suelo o agregado para el cual el 10% de ese material, en peso, tiene un tamaño menor, y corresponde a $P = 10\%$ de la curva granulométrica, de modo que el 10 % de las partículas son más finas que D_{10} , y el 90% más grueso.

Tamaño de partículas.

Según la investigaciones de Qian et al. (2021), los sustratos con partículas de menor tamaño, se presenta una mayor proporción de poros pequeños, lo que se traduce en una capacidad superior para retener los contaminantes, lo que, a su vez, mejora la eficacia del proceso de eliminación; Por otro lado, según la investigación de (Zhang et al., 2021), los sustratos que presentan partículas de mayor tamaño exhiben una mayor capacidad de dejar pasar el agua y pueden favorecer el movimiento hidráulico en los humedales, lo que contribuye a mejorar la eficacia en el proceso de tratamiento.

Porosidad.

Según las investigaciones de Wu et al. (2019), los sustratos con una alta porosidad tienen una mayor capacidad de retener los contaminantes, lo que aumenta la eficiencia de la

remoción; Por otro lado, según la investigación de Zou et al. (2021), la porosidad del sustrato también afecta la distribución del flujo hidráulico en los humedales. Los autores encontraron que los sustratos con una porosidad más alta tienen una menor resistencia al flujo hidráulico y pueden mejorar la eficiencia del transporte de agua y la remoción de contaminantes.

Permeabilidad.

En el contexto de la granulometría del sustrato en los humedales de flujo subsuperficial horizontal, la permeabilidad es un factor importante en la remoción de contaminantes. Según la investigación de Yang et al. (2018), los sustratos con una permeabilidad más alta tienen una mayor eficiencia de remoción de nitrógeno, lo que se debe a una mejor distribución del flujo hidráulico en el sustrato.

Por otro lado, según la investigación de Zhu et al., (2020), la permeabilidad del sustrato también puede afectar la capacidad de los humedales para retener los contaminantes. Los autores encontraron que los sustratos con una permeabilidad más baja pueden retener mejor los contaminantes, lo que aumenta la eficiencia de la eliminación.

Distribución del tamaño de partículas.

Según la investigación de Zhang et al. (2021), los humedales con una distribución de tamaño de partículas uniforme tuvieron una mayor eficiencia de eliminación de nitrógeno y fósforo en comparación con los humedales con una distribución de tamaño de partículas no uniforme; Por otro lado, según la investigación de (Sánchez et al., 2022), la distribución de tamaño de partículas del sustrato puede influir en la diversidad y abundancia de las comunidades microbianas en los humedales. Los autores encontraron que los sustratos con una distribución de tamaño de partículas más uniforme tenían una mayor diversidad y abundancia de bacterias y hongos que los sustratos con una distribución de tamaño de partículas no uniforme.

Tiempo de residencia o tiempo de retención hidráulica (TRH).

Según la investigación de Li et al. (2022), los lechos con partículas más grandes y menos porosidad retienen el agua durante más tiempo en comparación con aquellos con partículas más pequeñas y una mayor porosidad. Asimismo, se encontró que los lechos con partículas más pequeñas y una porosidad más alta presentan una mayor capacidad para atrapar sustancias y favorecen una tasa más rápida de intercambio de nutrientes, lo que, a su vez, mejora la eficiencia en la eliminación de contaminantes; Por otro lado, según la investigación de (Xue et al., 2019), el tiempo de residencia también puede ser influenciado por la forma del humedal. Los humedales con forma de "S" tienen un tiempo de residencia más largo en comparación con los humedales con forma de "U", lo que mejora la eficiencia de eliminación de contaminantes.

2.2.12. Efecto del sustrato como medio granular en humedales.

Tipo de contaminantes.

Según Du et al. (2019), indicaron que los sustratos con partículas más pequeñas y una porosidad mayor demuestran un mayor rendimiento en la eliminación de nitrógeno, mientras que los sustratos con partículas de mayor tamaño y una porosidad menor son más eficaces en la eliminación de fósforo; Por otro lado, según la investigación de Li et al. (2022), la granulometría del sustrato también puede influir en la eficiencia de la eliminación de contaminantes emergentes, como los productos farmacéuticos. Los autores encontraron que los sustratos con una mayor proporción de partículas finas tienen una mayor capacidad de adsorción para los productos farmacéuticos, lo que aumenta la eficiencia de la eliminación.

Concentración de contaminantes.

Según la investigación de Chen et al. (2019), los sustratos que presentan partículas más grandes y una menor porosidad se muestran más eficaces en el tratamiento de aguas con concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo, en contraste con los sustratos que poseen partículas más pequeñas y una mayor porosidad, que son más efectivos en el tratamiento de aguas con concentraciones más bajas de nitrógeno y fósforo.

Por otro lado, según la investigación de Zhang et al. (2021), los sustratos que muestran una uniformidad en la distribución del tamaño de partículas son más eficaces en el tratamiento de aguas con altas concentraciones de contaminantes, mientras que los sustratos con una distribución no uniforme son más eficaces en el tratamiento de aguas con bajas concentraciones de contaminantes.

Eficiencia de los contaminantes.

Según la investigación de Guo et al. (2020), los sustratos que presentan partículas más pequeñas y una porosidad más elevada demuestran una mayor eficacia en la eliminación de nitrógeno en contraposición a los sustratos con partículas de mayor tamaño y una porosidad más reducida; Por otro lado, según la investigación de Tang et al. (2021), los sustratos que presentan una uniformidad en la distribución del tamaño de partículas son más eficaces en la eliminación de nitrógeno y fósforo en comparación con los sustratos que muestran una distribución no homogénea.

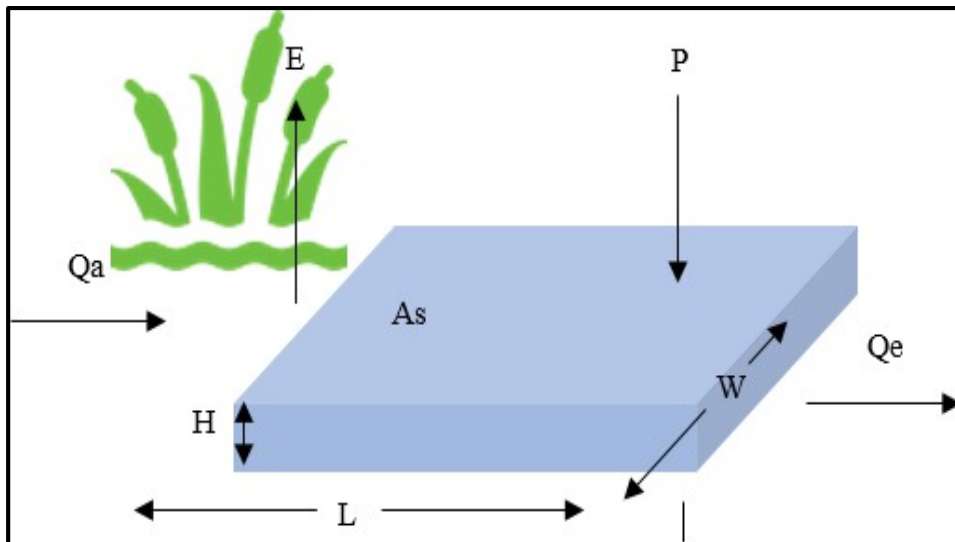
Remoción de contaminantes.

Según Feng et al. (2020), sostienen que los sustratos con partículas de mayor tamaño y una mayor porosidad demuestran una mayor eficiencia en la eliminación de nitrógeno y fósforo en comparación con aquellos sustratos que poseen partículas más pequeñas y menor porosidad; Por otro lado, según la investigación de Zhang et al. (2021), La variabilidad en la

distribución del tamaño de partículas en el sustrato puede igualmente influir en la depuración de contaminantes en los humedales.

Figura 9

Esquema de un humedal artificial.



Fuente: (Asprilla et al., 2020)

Q_a es el caudal del afluente, (E) es la evapotranspiración, (P) es la precipitación, (A_s) el área superficial; (H) la altura, (L) la longitud y (W) el ancho del humedal.

Capítulo III

3. Método De La Investigación

3.1. *Enfoque*

Por enfoque

De acuerdo al tipo de investigación, es cuantitativo; pues se buscan valores que permitan cuantificar y analizar la remoción de contaminantes en humedales artificiales.

Por propósito

Es de tipo aplicada; pues, deseamos conocer y manipular las variables del proceso por su carácter investigativo; Por lo tanto, se pretende demostrar que en uno de los humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal con sustrato de determinado diámetro, presenta mejor remoción de contaminantes de las aguas residuales afluentes del sedimentador integrado N° 2.

3.2. *Alcance*

El presente trabajo de investigación es de tipo cuantitativo y nivel de investigación exploratorio, el objetivo es demostrar que en los humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal con determinados diámetros del sustrato, hay mejor remoción de contaminantes.

3.3. *Diseño de la Investigación*

El diseño de la presente investigación es Experimental; ya que se manipulan variables como: la granulometría, los coeficientes de uniformidad y curvatura, el diámetro efectivo del sustrato en la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal con diferentes diámetros de grava.

3.4. *Población y Muestra*

Población

Para la presente investigación se emplearon aguas residuales afluentes del sedimentador integrado N° 02 de la planta de tratamiento de aguas residuales, “La Totorá”.

Muestra.

Se evaluaron los efluentes de 03 humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal (HAFSSH) a escala de laboratorio, variando el diámetro del sustrato con gravas de $\varnothing \frac{1}{4}$ ", $\varnothing \frac{1}{2}$ ", $\varnothing \frac{3}{4}$ " en cada humedal.

3.5. *Hipótesis*

3.5.1. Hipótesis General

La granulometría del sustrato influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

3.5.2. Hipótesis Específicas

- El coeficiente de uniformidad del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.
- El coeficiente de curvatura del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.
- El diámetro efectivo del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

3.5.3. Planteamiento de la Hipótesis Nula y Alterna (H0 y H1).

Bajo el contraste de hipótesis estadístico se plantea las siguientes decisiones:

Hipótesis Nula H0: que la granulometría del sustrato No influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

Hipótesis Alterna H1: que la granulometría del sustrato Si influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

Para ello, se hará uso de un test de comparaciones múltiples que hará una comparación de sus medias. La técnica de ANVA para determinar la significancia es la prueba DUNCAN, con un Nivel de significación del 0.05 (5%).

3.6. Operacionalización de Variables, Definición Conceptual y Operacional

Tabla 4

Operacionalización de variables.

Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Granulometría del sustrato	La granulometría se refiere a la distribución de tamaño de partícula de un sustrato (Ortiz, 2018). La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. (Delgadillo et al., 2010).	La variación en el tamaño de las partículas puede tener un impacto en la capacidad de porosidad y permeabilidad del lecho del humedal (Ortiz, 2018). La más fina tienen una mayor superficie específica, lo que puede mejorar la capacidad de retener y eliminar contaminantes; sin embargo, los sustratos más finos pueden	Condiciones de granulometría del sustrato	Coeficiente de uniformidad (Cu)	Análisis granulométrico
				Coeficiente de curvatura (Cc)	Análisis granulométrico
				Diámetro efectivo (De)	Análisis granulométrico
				Porcentaje de absorción (%)	Análisis granulométrico
				Porcentaje de vacíos (%)	Análisis granulométrico
				Tamaño de partículas	Análisis granulométrico

obstruirse
fácilmente (Xue
et al., 2019).

Variable dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH)	Por su composición, los humedales artificiales son sistemas complejos de tratamiento de aguas residuales que poseen un conjunto diverso de vías para eliminar patógenos y contaminantes (Dotro et al., 2017).	Estos sistemas tratan el agua eliminando la materia orgánica (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y eliminando el fósforo. Los mecanismos son complejos e incluyen oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química. (Cooper et al., 1996).	Condiciones hidráulicas de los humedales artificiales de FSSH	Tiempo de retención hidráulica (TRH)	Horas
				Caudal de operación	m ³ /día
				Volumen útil	m ³
			Condiciones fisicoquímicas y bacteriológicas del afluente y efluente	Temperatura	°C
				pH	Unidad
				Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm
				Sólidos disueltos totales (SSD)	mg/L
				Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L
				Coliformes fecales	NMP/100 ml
				Fosfatos	mg/L
				Nitratos	mg/L
			Condiciones de vegetación o depuradores	Macrófita <i>Typha angustifolia</i> "totora"	Unidad/m ²

Fuente: Elaboración propia

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Técnicas

Las técnicas a utilizar serán recolección de datos, análisis e interpretación de resultados. Para ello, se aplicaron las técnicas de campo y de gabinete

Técnicas de campo, empleando la observación directa, con los acontecimientos y ensayos se registraron los datos de la remoción de contaminantes en los humedales.

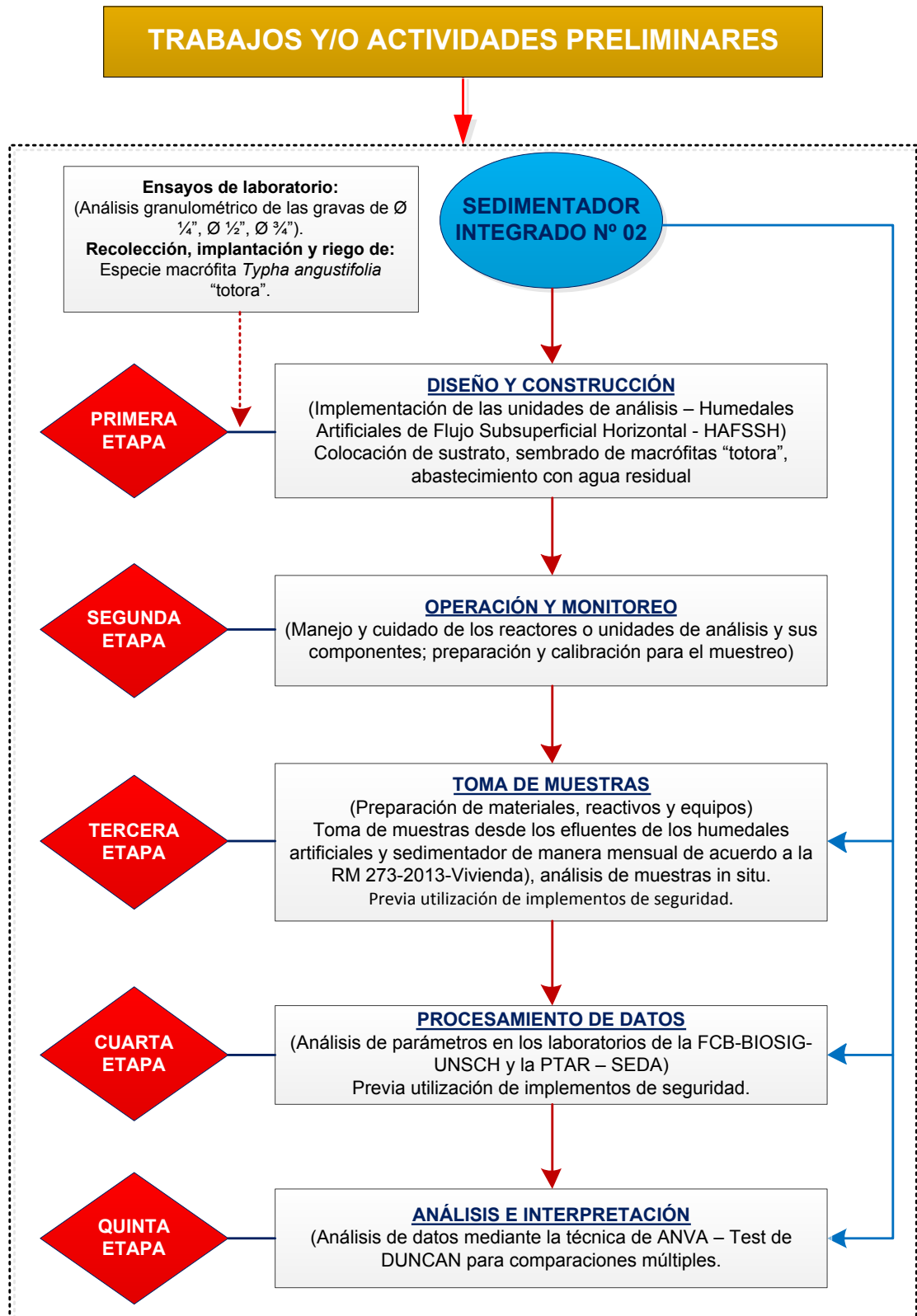
Recolección de datos: Se obtuvo mediante ensayos, pruebas y cálculos en campo (In Situ) y en laboratorios de la UNSCH y el PTAR; además de información.

El la Figura N° 10 se muestra el Procedimiento del Trabajo de Investigación, al cual es parte de la metodología; se describe por etapas y actividades realizadas durante el trabajo, el cual correspondería a las técnicas.

Por otro lado en la Tabla N° 5 se muestran los Indicadores e instrumentos de recolección de datos, donde se describen la Técnica, el Instrumento y la Descripción.

Figura 10

Procedimiento del Trabajo de Investigación.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Indicadores e instrumentos de recolección de datos.

Variable Independiente	Indicadores	Escala de medición	Técnica	Instrumento	Descripción
Granulometría del sustrato	Coefficiente de uniformidad (Cu)	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
	Coefficiente de curvatura (Cc)	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
	Diámetro efectivo (De)	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
	Porcentaje de absorción (%)	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
	Porcentaje de vacíos (%)	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
	Tamaño de partículas	Análisis granulométrico	Método mecánico (Tamizado de muestra)	Tamices de malla de alambre	La muestra seca pasa por una serie de tamices
Variable dependiente	Indicadores	Escala de medición	Técnica	Instrumento	Descripción
Contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH)	Tiempo de retención hidráulica (TRH)	Horas	Medición indirecta	Cálculo	Cálculo por medio de fórmulas y tablas excel
	Caudal de operación	m3/día	Método de Aforo (Observación y análisis)	Recipiente graduado y cronómetro	Método volumétrico de medición de caudales
	Volumen útil	m3	Medición indirecta	Cálculo	Cálculo por medio de fórmulas
	Temperatura	°C	Prueba estandarizada	Multiparámetro Modelo HI98130-HANNA	In Situ, observar y toma de dato
	pH	Unidad	Prueba estandarizada	Multiparámetro Modelo HI98130-HANNA	In Situ, observar y toma de dato
	Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	Prueba estandarizada	Multiparámetro Modelo HI98130-HANNA	In Situ, observar y toma de dato
	Sólidos disueltos totales (SSD)	mg/L	Prueba estandarizada	Multiparámetro Modelo HI98130-HANNA	In Situ, observar y toma de dato
	Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	Prueba estandarizada	Incubadora y sistema de medición de DBO5-BD 600-Lovidond	En laboratorio. Método colorímetro a reflujo cerrado
	Coliformes fecales	NMP/100 ml	Técnica por diluciones en tubo Múltiple	Tubos, botellas y diluyentes	En laboratorio, se realiza mediante el proceso de diluciones decimales seriados.
	Fosfatos	mg/L	Prueba estandarizada	Espectrofotómetro Genesys 10SUV-VIS	En laboratorio. Absorción de radiación de frecuencia en el rango de longitudes de onda.
	Nitratos	mg/L	Prueba estandarizada	Espectrofotómetro Genesys 10SUV-VIS	En laboratorio. Absorción de radiación de frecuencia en el rango de longitudes de onda.
	Macrófita <i>Typha angustifolia</i> "totora"	Unidad/m2	Recolección e implantación	Herramienta manual	Metodología, según Delgadillo et al., 2010

Nota: Los parámetros físicos, químicos y biológicos se determinan por Métodos estándares para examen de aguas residuales-Resolución Ministerial N° 273-2013-Vivienda.

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Instrumentos

Tal como se muestra en la Tabla N° 5, se utilizaron:

a) Diario de campo.- En el cual se detallan las ocurrencias, datos tomados de los parámetros analizados In Situ, cálculos, registros, entre otras.

b) Equipo electrónicos.- La utilización de la electrobomba de ½ HP, para llenado de los Tanques Cisterna (600 L) con aguas residuales desde el Sedimentador Integrado N° 02.

c) Equipos en general.- Para análisis y toma de datos tanto del afluente como de los efluentes: Multiparámetro Modelo HI98130 – HANNAV, Incubadora y sistema de medición de DBO5-BD 600-Lovidond, Espectrofotómetro Genesys 10SUV-VIS; además de equipo celular, calculadora, laptop, cámara fotográfica, y laboratorios etc.

3.8. Técnicas Estadísticas para el Procesamiento de Información

Para el procesamiento de datos obtenidos en laboratorio y en campo se harán uso de programas como el Excel y software como InfoStat 2020 para el análisis estadístico. Estas herramientas sistematizadas permitieron realizar el procesamiento y análisis. El programa Excel fue útil para organizar y manipular los datos y también para crear tablas y gráficos que ayudan con los resultados; mientras que el InfoStat que es un software para análisis estadístico de aplicación general desarrollado bajo la plataforma Windows; por medio de este software, se hará uso un test de comparaciones múltiples de las medias. El test es la prueba DUNCAN, una técnica de ANVA para determinar la significancia, con un Nivel de significación del 0.05 (5%).

La prueba Duncan para su análisis e interpretación requiere de las medias ordenadas de mayor a menor, tener los cuadrados medios del error (en la tabla ANVA), los grados de libertad del error, el número de repeticiones para calcular la varianza, el número de tratamientos, nivel de significancia y valores de la tabla Duncan.

3.9. Desarrollo del Trabajo de Tesis

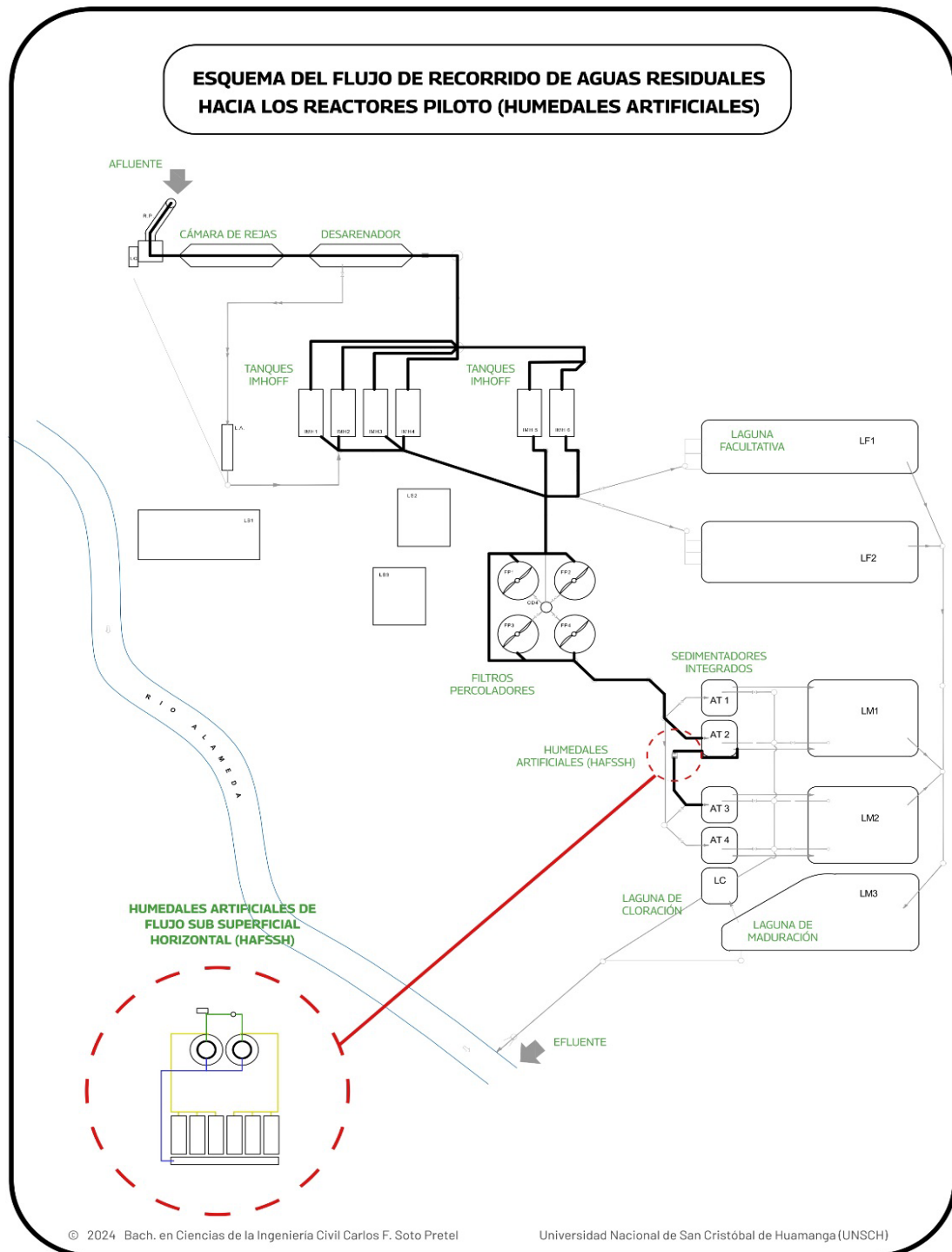
Se describe el desarrollo o las etapas del trabajo de investigación tal y cómo se describe en la Figura 7 y de esta forma se obtuvo resultados de la instalación y funcionamiento de nuestros reactores biológicos a escala de laboratorio.

3.9.1. Identificación de la zona del proyecto

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se utilizaron las Instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totora” pertenecientes a la Empresa Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Ayacucho S.A. SEDA – Ayacucho. Ubicado en el distrito de Jesús Nazareno, Provincia de Huamanga, Región Ayacucho.

Figura 11

Ubicación del punto de proyecto y el flujo de recorrido de aguas residuales.



Fuente: Elaboración propia

3.9.2. Actividades preliminares

Previo al desarrollo de las actividades se realizaron coordinaciones y permisos correspondientes de la empresa SEDA, se identificó el punto para la construcción de los humedales artificiales, punto de captación de aguas residuales, punto de conexión a energía

eléctrica, lugar para extraer plantones o rizomas de “totora”, horario de ingreso, operación, monitoreo y toma de muestras para los análisis respectivos.

3.9.3. Diseño y construcción de los humedales (HAFSSH)

Enfoque de diseño

Según Dotro et al. (2017), hay muchas formas de dimensionar y diseñar un sistema de tratamiento de humedales. Al diseñar humedales, es importante tener en cuenta que los parámetros de diseño publicados se basan en datos operativos de sistemas reales en todo el mundo. El diseño debe ser compatible con las condiciones físicas y operativas de los datos fuente, incluyendo: tipo de humedal, concentraciones de entrada y salida, cargas hidráulicas y de masa, tamaño, profundidad, clima y precipitaciones, ecología, comunidad vegetal etc.

De acuerdo con la revisión bibliográfica se compilaron selectivamente las metodologías de diseño y tratándose de un trabajo de investigación con fines académicos, el proyecto se desarrolló teniendo como fuente los textos de (Delgadillo et al., 2010) y (Dotro et al., 2017), los humedales se consideran reactores; que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme; La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Tabla 6

Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal

Parámetros	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	Días	4 15	7
Profundidad agua	m	0,1 0,8	0.6
Área	m ² /heq	2,5 5	
Carga orgánica	gDBO ₅ /m ² día	3 7,5	<6
Carga orgánica	kg DBO ₅ /heq.día	<70	
Carga hidráulica	m ³ /m ² .día	0,1 0,2	
Características constructivas			
Grava ingreso salida	mm	50 100	50
		3 6	
Grava media	mm	5 10	
		6 12	
Coefficiente uniformidad		3 5	<5
Profundidad media	m	0.70 1.5	0.7
Pendiente	%	0 1	0.5
Relación largo ancho (L/A)		2:1 - 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada	pulgada	3 4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada canal	pulgada	2 4	3

Fuente: Delgadillo et al., 2010

Tabla 7

Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, k_s (m ³ /m ² /d)	Porosidad (n) %
Arena gruesa	2	100 - 1000	28 - 32
Arena gravosa	8	500 - 5000	30 - 35
Grava fina	16	1000 - 10000	35 - 38
Grava media	32	10000 - 50000	36 - 40
Roca gruesa	128	50000 - 250000	38 - 45

Fuente: Delgadillo et al., 2010

Con las consideraciones indicadas, ambos autores coinciden en una forma de dimensionamiento: Relación Longitud – Ancho (L/A) de 2 a 1, 3 a 1, 4 a 1 y el que asumimos por la topografía, pendiente y disposición del terreno fue de **L/A = 2 a 1**.

Tabla 8

Dimensionamiento de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal.

Relación Longitud – Ancho (L/A) _{aprox} = 2:1 (1.40x0.65)			
Dimensiones del Humedal		Área Útil del Humedal	
Largo (L) =	1.40 m	Largo (L) =	1.20 m
Ancho (A) =	0.65 m	Ancho (A) =	0.45 m
Altura =	0.55 m	Altura =	0.45 m
Área superficial =	0.91 m ²	Área superficial =	0.54 m ²
Volumen =	0.50 m ³	Volumen =	0.24 m ³
		Borde libre =	0.10 m
Sección del área de descarga		Sección total del Humedal	
Largo (L) =	0.33 m	Largo (L) =	1.73 m
Ancho (A) =	0.65 m	Ancho (A) =	0.65 m
Altura =	0.55 m	Altura =	0.55 m
Altura de losa		Losa para los 06 humedales descarga	
e =	0.10 m	3.40 x 1.73 = 5.88 m ²	
Muro del Humedal+tarrajeo			
e =	0.10 m		

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño se utilizaron el programa Adobe Illustrator, y los software AutoCAD y SketchUp Pro; además del Google Earth Pro.

Área total de terreno designado: 6 m de largo por 4 m de ancho; de ello, para la construcción de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal se excavó 3.50x2 = 7 m², previo desbroce y limpieza de terreno y a continuación el trazo y replanteo respectivo.

Tabla 9*Materiales para el proceso constructivo de 06 humedales artificiales (HAFSSH).*

Descripción	Unidad	Cantidad	Descripción	Unidad	Cantidad
Ladrillos king kong (24x11.5x8) cm	und	340	Gotero autorregulado HDPE Ø 1/4"	bls	1
Cemento (42.5 Kg)	bls	7	Tubería PVC SAP Ø 1"	m	2
Arena de gruesa o de asentar	m ³	0.25	Adaptador PVC SAP de Ø 1"	und	2
Hormigón	m ³	0.8	Tee PVC SAP de Ø 1"	und	1
Arena fina	m ³	0.25	Reducción PVC SAP de Ø 1" a Ø 3/4"	und	2
Agua	Litro	300	Adaptador PVC SAP de Ø 1"	und	2
Piedra Ø 2"	m ³	0.5	Unión universal roscado PVC SAP de Ø 1"	und	2
Grava (piedra chancada) Ø 1/4"	m ³	0.35	Codo PVC SAP de Ø 1"	und	3
Grava (piedra chancada) Ø 1/2"	m ³	0.35	Tubería PVC SAP Ø 1/2"	m	15
Grava (piedra chancada) Ø 3/4"	m ³	0.35	Tapón roscado hembra PVC SAP de Ø 1/2"	und	2
Rizomas o plántulas de "totora"	und	30	Adaptador PVC SAP de Ø 1/2"	und	3
Manguera HDPE Ø 1"	m	100	Tee PVC SAP de Ø 1/2"	und	4
Codo hembra de compresión HDPE Ø 1"	und	2	Codo 90° PVC SAP Ø 1/2"	und	30
Acoplador de codo hembra HDPE Ø 1"	und	2	Llave de paso PVC SAP Ø 1/2"	und	6
Electrobomba 1/2 HP, salida/entrada Ø 1"	und	1	Tubería PVC SAP Ø 3/4"	m	2
Cable THW-90, 12 AWG	rollo	2	Válvula bola con rosca PVC SAP Ø 3/4"	und	2
Tanque Cisterna + accesorios	und	2	Reductor PVC SAP de Ø 3/4" a Ø 1/2"	und	3
Manguera HDPE Ø 1/4"	m	10	Adaptador PVC SAP de Ø 3/4"	und	4
Tapón sin rosca HDPE Ø 1/4"	und	6	Filtro estándar sanitario entrada/salida Ø 3/4"	und	1
Adaptador dentado HDPE Ø 1/4"	und	6	Vaso precipitado de 250 ml	und	3

Fuente: Elaboración propia.**Instalación de los Humedales (HAFSSH)**

Se inició con el vaciado de la losa para 06 humedales artificiales de 5.88 m² y se utilizó un volumen total de 0.588 m³ de concreto simple, la pendiente fue mínima de 0.5 %. La proporción de concreto para losa fue de C:H = 1:12 (C=3.6 bls; Hormigón=1.23 m³; Agua=0.12m³). Sobre él se construyeron los humedales artificiales con ladrillo (24x11.5x8) cm y mortero (1.5 cm), los muros de ladrillo se asentaron con aparejo tipo canto y una junta e = 1.5 cm, proporción 1:4 (C=8.9 bls; AF=1 m³; Agua=272 L). Luego fue tarrajado con mortero de proporción 1:4 (C=8.9 bls; AG=1 m³; Agua=272 L), e = 1 cm

De 06 humedales en funcionamiento, 03 son alternos para periodos de reposo o casos de emergencia por acumulación de sedimentos y algas, obstrucción de goteros, mantenimiento, etc; los otros 03 para periodo de aplicación de aguas residuales y toma de muestras propiamente. Por gravedad se abastecen los humedales con aguas residuales desde los tanques cisterna, previo llenado por bombeo desde el sedimentador N° 02.

Figura 12

Diseño de los humedales, vistas de planta, lateral e isométrico.

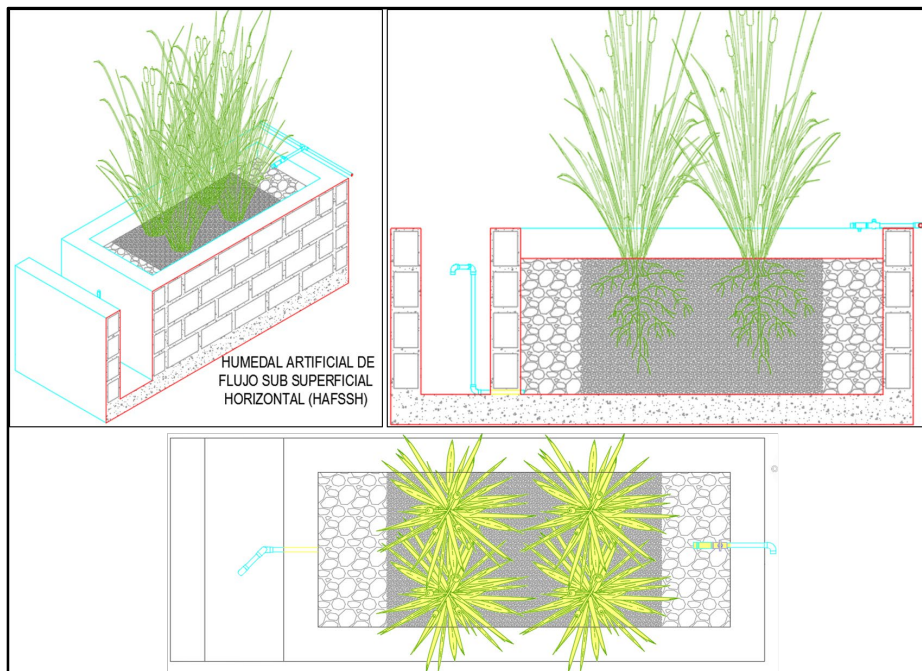
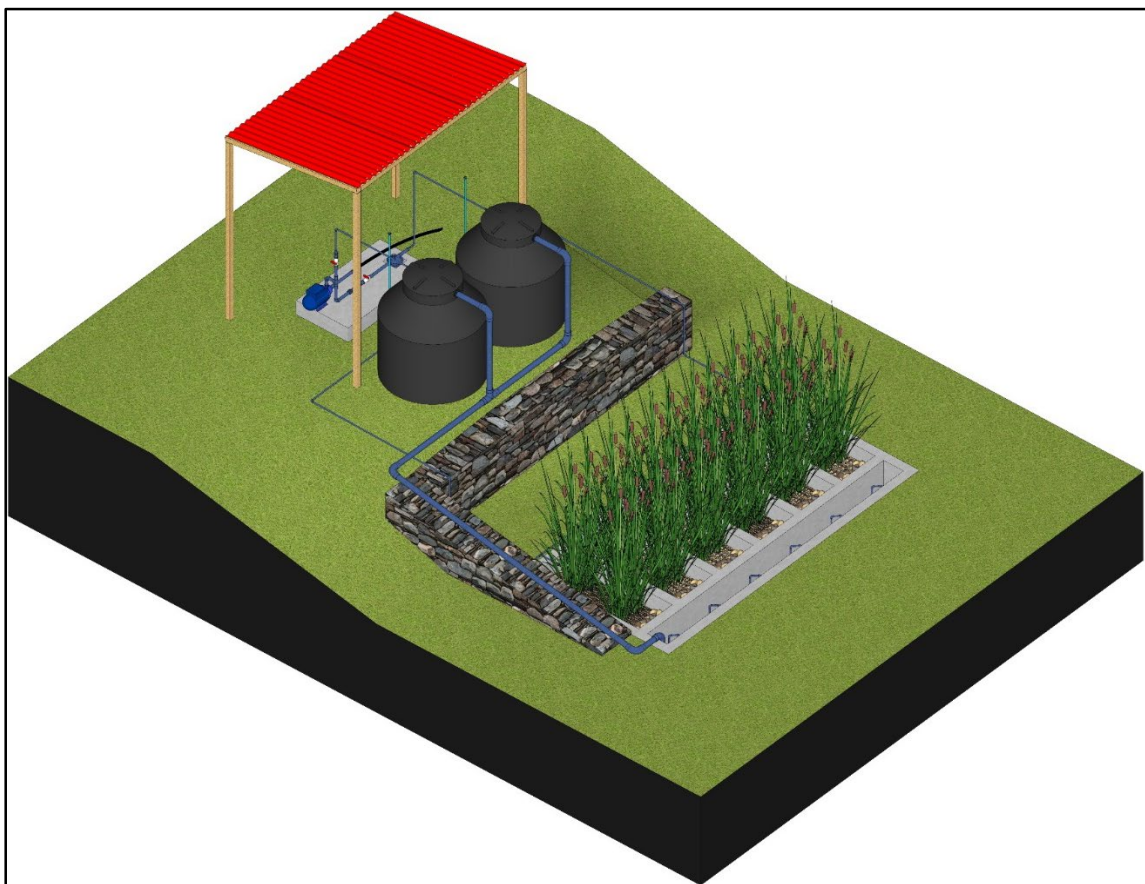


Figura 13

Imagen renderizado de los humedales artificiales de (HAFSSH)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

Proceso constructivo de los humedales artificiales (HAFSSH)



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se muestra en la Figura 14, como material granular o sustrato, se utilizó piedra de $\varnothing 2''$ y gravas de $\varnothing \frac{1}{4}''$ (0.635 cm), $\varnothing \frac{1}{2}''$ (1.27 cm), $\varnothing \frac{3}{4}''$ (1.905 cm), con diámetro efectivo (De), coeficiente de (Cc), coeficiente de uniformidad (Cu), % de absorción y % vacíos indicados en los Ensayos de laboratorio anexados al presente informe de tesis. La colocación de piedra mediana y chancada fue aleatoria ocupando un volumen efectivo útil de 0.24 m^3 .

Figura 15

Distancia desde Sedimentador 2 hacia los humedales artificiales.



Fuente: Propia.

Ubicando los humedales en la parte baja de los Filtros Percoladores y a 20 m de la salida del Sedimentador Integrado N° 02, desde donde se alimentan a los humedales con ayuda de una Electrobomba (1/2 HP y conexión de entrada y salida para manguera y accesorios HDPE de Ø 1") continua la conducción con manguera HDPE de Ø 1" hasta los tanques cisterna de 600 L de capacidad y desde aquí se alimenta a los humedales artificiales con tuberías PVC SAP de Ø ½". Los Sedimentadores Integrados como parte del tratamiento secundario son alimentados con aguas residuales desde los Filtros Percoladores por medio de una caja de distribución (CD4).

Los 06 humedales o reactores fueron construidos de forma horizontal y en paralelo, los reactores en ambos extremos contienen piedra mediana Ø 2", y chancada de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾" en la parte media hasta los 0.45 m de altura con un borde libre de hasta 0.10 m por encima del sustrato, la vegetación utilizada en los humedales artificiales son macrófitas de *Typha angustifolia* "tatora", el cual fue distribuida en la parte media.

Figura 16

Disposición de los humedales artificiales, vegetación, sustrato y descarga final.



Fuente: Propia.

3.9.4. Cálculo del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Para ello, se requieren resultados de los ensayos de granulometría, los cuales se acompañan en los anexos del presente informe. Se hace el cálculo TRH teórico y se define utilizando el caudal afluente (Q_i) y el volumen de agua estimado (teniendo en cuenta la porosidad en los humedales de flujo subsuperficial, ver siguiente ecuación. (Dostro et al., 2017)

$$\tau = \frac{\text{Volumen del Líquido}}{\text{Caudal}} = \frac{\varepsilon V}{Q_i} = \frac{\varepsilon h A}{Q_i}$$

τ = tiempo de retención hidráulica nominal (teórico), días

ε = porosidad (fracción de volumen del humedal ocupado por el agua), adimensional

h = profundidad del agua en el humedal, m

A = Área superficial del humedal, m²

Q_i = Caudal de entrada o afluente, m³/d

3.9.5. Toma de muestras

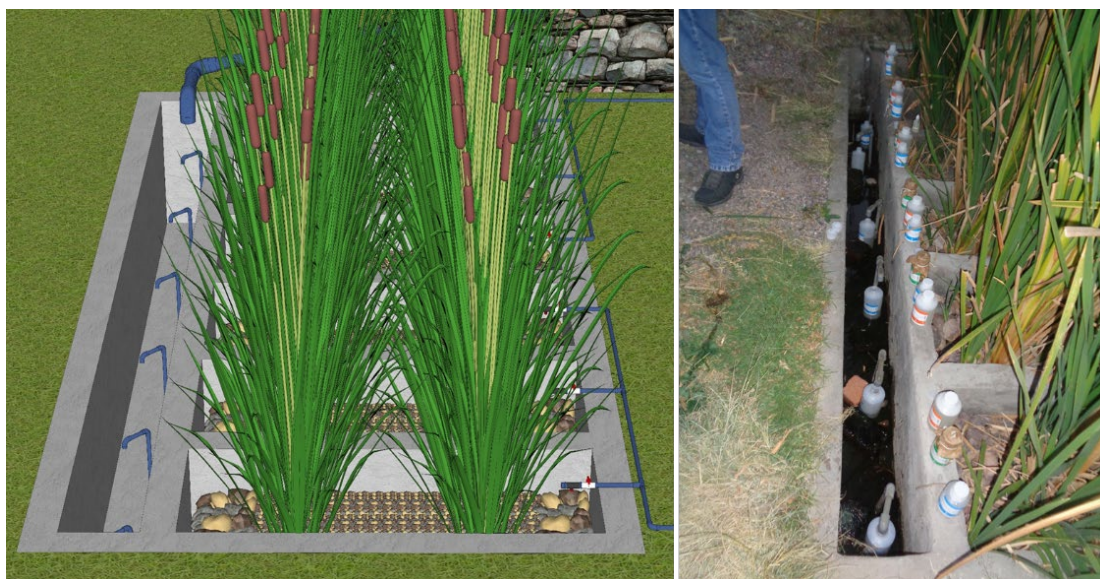
Previo a la toma de muestras, durante el monitoreo se hacen los preparativos como la estandarización o ajuste del flujo de caudal de los 03 efluentes en los humedales, los 03 goteros deberán tener el mismo caudal de entrada que es de 18.76 L/día. Los puntos de muestreo se ubican uno en la salida del Sedimentador integrado N° 02 (P0) y 03 de los efluentes de los HAFSSH (P1, P2, P3) Figura 16. Los parámetros a evaluar In Situ se describen en la Tabla N° 5: Indicadores e instrumentos de recolección de datos, que son la temperatura, pH, Conductividad eléctrica, y Sólidos totales disueltos (TDS); por otro lado, las muestras de 500 ml se llevan a los laboratorios para su análisis correspondiente (DBO5, Coliformes fecales, fosfatos y nitratos). Las muestras se recolectan bajo condiciones de asepsia en frascos estériles y herméticos, se rotulan los datos del punto de muestreo, fecha, hora y se colocan en el Cooler para el transporte de muestras hacia los laboratorios. In Situ se tomó 50 ml de muestra, con ayuda del Multiparámetro de realizan los análisis respectivos.

La frecuencia de toma de datos es de manera mensual (cada 20); mientras que, el monitoreo y operación es permanente. El llenado de los tanques cisterna de 600L cada uno, se hace cada 3 a 4 días. Los muestreos se realizaron teniendo en cuenta el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2013).

Los materiales empleados fueron: agua destilada, vaso de precipitado (250 ml, 500 ml, 50 ml), frascos de plástico de ½ litro, registro de datos de campo, equipos como Multiparámetro, cronómetro y cámara fotográfica, muestreador; del mismo modo, la indumentaria de bioseguridad: guantes quirúrgico, mascarillas KN-95, lentes y guardapolvo.

Figura 17

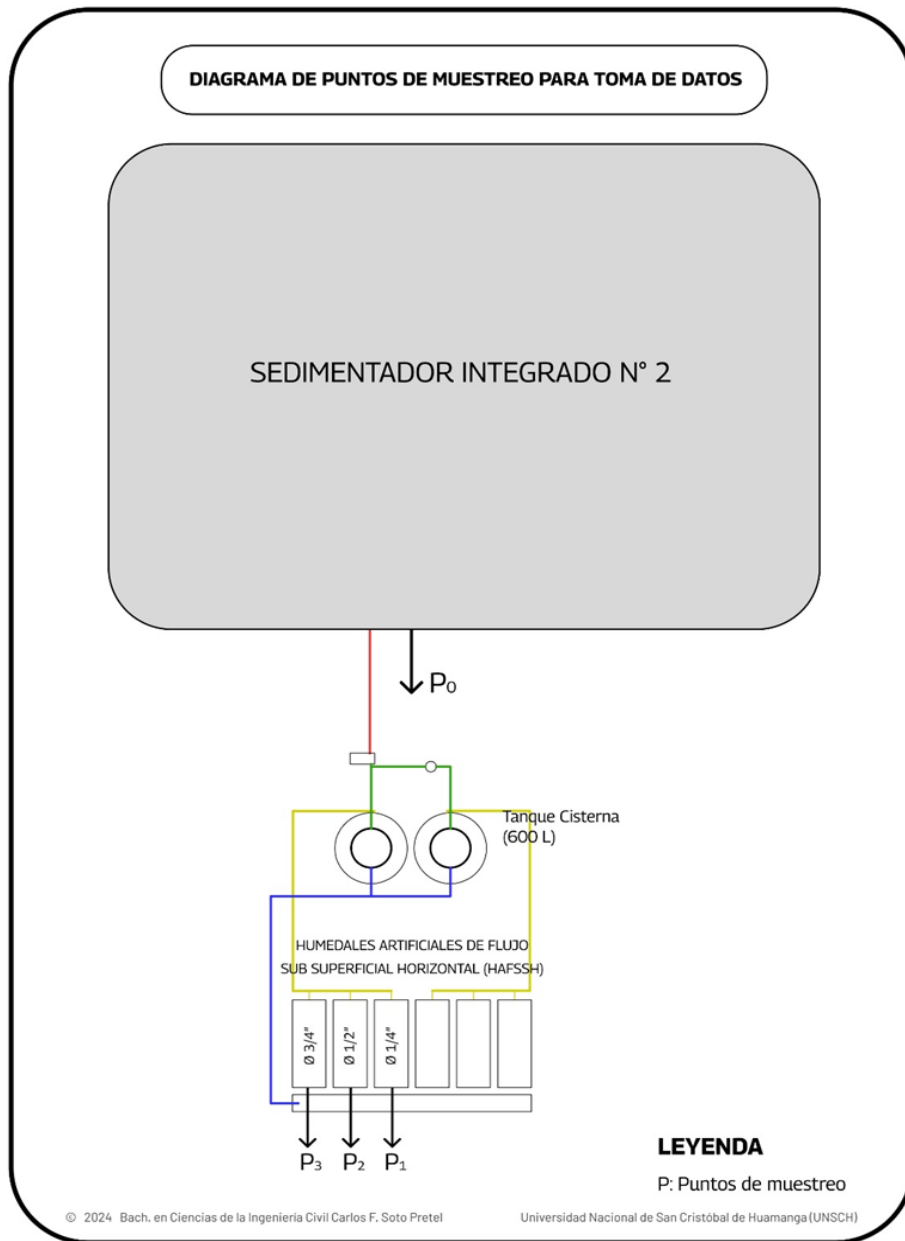
Disposición de ingreso – salida y muestreo en los humedales.



Fuente: Propia.

Figura 18

Diagrama de ubicación de los puntos de muestreo.



Fuente: Propia.

Para la determinación de la eficiencia o remoción del tratamiento de las aguas residuales en los humedales artificiales, se realizó utilizando la ecuación siguiente:

$$x = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) \times 100 \quad \text{ó} \quad x = \left(1 - \frac{C_f}{C_o} \right) \times 100, \text{ según Aslan y Kapdan, 2006}$$

Donde:

X = Rendimiento de la remoción del contaminante (%).

Co = Concentración inicial del contaminante (del afluente).

Cf = Concentración final del contaminante (del efluente).

Capítulo IV

4. Resultados

En este Capítulo se exponen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, así como la discusión e interpretación de los parámetros evaluados conforme a lo descrito en la Operacionalización de Variables; esto, luego de la instalación e implementación de los Humedales, puesta en marcha y operación para determinar la hipótesis y contrastarlos. Los resultados del efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales, fueron tomados a partir de los 03 HFSSH (Efluentes) y del Sedimentador Integrado N° 2 (Afluente), durante 05 meses desde abril hasta agosto del 2023; quiere decir, que se describe el efecto de la granulometría de 03 sustratos (de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾") y se comparó en cuál de ellas hay mayor eficiencia de remoción de contaminantes.

4.1. *Contrastación de Hipótesis*

Sabemos que la hipótesis alternativa es aquella con la que pretendemos demostrar; mientras que, la nula es lo que se quiere refutar.

4.1.1. Planteamiento de la Hipótesis.

La granulometría del sustrato influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR "la Totorá".

4.1.2. Verificación de la hipótesis

Según la variable independiente, la granulometría del sustrato influiría en la remoción de contaminantes; por lo tanto, el análisis a realizar es cómo influyen el diámetro efectivo, coeficientes de uniformidad y curvatura del sustrato, en la remoción de contaminantes, mejorando así la eficiencia de los humedales con diferentes diámetros.

4.1.3. Contrastación de la hipótesis con los resultados

Hipótesis Nula y Alterna

H0: que la granulometría del sustrato No influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

H1: que la granulometría del sustrato influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho.

Para H0: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$; No existe diferencia entre las medias del % de remoción de contaminantes en los HAFSSH con grava de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾"

Para H1: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$; Existe diferencia entre las medias del % de remoción de contaminantes en los HAFSSH con grava de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾"

4.1.4. Nivel de Significación

El nivel de significancia será del 0.05 (5%).

4.1.5. Función de prueba

La prueba a utilizar en el contraste de la hipótesis será el test de comparaciones múltiples (comparación de sus medias). La técnica de ANVA para determinar la significancia, es la prueba o test de DUNCAN, con un Nivel de significación del 0.05 (5%).

4.1.6. Región crítica:

Si $p - \text{valor} > 0.05$, se acepta la H_0 y se rechaza la H_1 .

Si $p - \text{valor} < 0.05$, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 .

4.2. Análisis e interpretación

4.2.1. Dimensionamiento del Sistema de Humedales Artificiales

Se describe y detalla en el capítulo 3, Tabla 8.

Área y volumen útil del Humedal		
Largo (L)	1.20	m
Ancho (A)	0.45	m
Altura (H)	0.45	m
Área superficial	0.54	m ²
Volumen	0.24	m ³
Borde libre	0.10	m

4.2.2. Resultados de Diámetro efectivo calculado, porosidad y Tiempo de retención hidráulica en los 03 humedales

Tabla 10

Cuadro resumen de la granulometría de los sustratos y porosidad calculada a partir de los diámetros efectivos (De).

Ø Grava	Pulgadas	cm	mm	De (D ₁₀) mm	Cu	Cc	% Absorción	% Vacíos (PUSS/PUCS)	Porosidad (n)
1/4"	0.25"	0.635	6.35	3.72	1.82	1.02	0.13	47/43	32.64
1/2"	0.50"	1.27	12.7	8.23	1.94	1.1	0.79	42/38	35.09
3/4"	0.75"	1.905	19.05	17.13	1.32	1.06	0.96	43/38	38.14

Peso unitario suelto seco (PUSS)

Peso unitario compactado seco (PUCS) método del apisonado

Fuente: Ensayo de análisis granulométrico.

Tabla 11

Porosidad calculada a partir de los diámetros efectivos (De) de cada sustrato

Ø Grava o sustrato	mm	De (D ₁₀) mm	Porosidad (n) %
1/4"	6.35	3.72	32.64
1/2"	12.7	8.23	35.09
3/4"	19.05	17.13	38.14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12*Cuadro de resultados del tiempo de retención hidráulica (TRH) en los 03 humedales*

Ø grava	Tiempo de llenado estandarizado (min)	Volumen de aforo (ml)	Porosidad <i>n</i>	Altura del humedal útil (m)	Área superficial (m ²)	Caudal de entrada (L/día)	Caudal de entrada (m ³ /día)	TRH (días)
HAFSSH 1/4"	19.20	250	0.33	0.45	0.54	18.76	0.0188	4.23
HAFSSH 1/2"	19.20	250	0.35	0.45	0.54	18.76	0.0188	4.54
HAFSSH 3/4"	19.20	250	0.38	0.45	0.54	18.76	0.0188	4.94

Fuente: Elaboración propia.* La porosidad fue calculado por interpolación a partir de la tabla N° 7 y el diámetro efectivo (De)

* Los goteros de entrada a los humedales se estandarizan previo al aforo y muestreo

* Los aforos se realizaron tanto a la entrada como a la salida (efluentes) de los humedales

* El muestreo del Sedimentador Integrado N° 02 se realiza a la salida

* El llenado de los tanques cisterna se realizó cada 4 días

4.2.3. Evaluación y análisis estadístico a partir de resultados In Situ y en Laboratorios.

De la toma de muestras mensuales y sus resultados del Afluente (Sedimentador Integrado N° 2) y los Efluentes o salidas (Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal) se construyen tablas, cuadros, diagramas y también las comparaciones múltiples.

Los análisis fueron realizados en los laboratorios de: Biodiversidad y Sistema de Información Geográfica (SIG) de la Facultad de Ciencias Biológicas - UNSCH y La PTAR "La Totorá".

Tomar en cuenta que de acuerdo a la referencia en la Figura 18: Diagrama de ubicación de los puntos de muestreo:

1.- El Afluente P0, está localizado en la salida del Sedimentador Integrado N° 2.

2.- Los Afluentes P1, P2, P3, están localizados en las salidas de cada Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSSH) con sustratos o grava de Ø ¼", Ø ½", Ø ¾".

En las siguientes tablas se caracterizan los resultados de los parámetros analizados en las aguas residuales tanto del Afluente como de los Efluentes; a continuación de ello, se describen los gráficos y el análisis estadístico.

Tabla 13

Valores de los parámetros analizados en el Afluente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Abril 2023.

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	°C	15.8	15.1	15.2	15.4
pH	Unidad	7.75	7.04	7.07	7.15
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1600	1170	1340	1405
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	710	433	465	510
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	190	34	38	40
Coliformes fecales	NMP/100 ml	22000000	2300000	3300000	4900000
Fosfatos	mg/L	26.48	11.88	14.12	17.86
Nitratos	mg/L	2.963	1.938	2.137	2.321

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Valores de los parámetros analizados en el Afluente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Mayo del 2023.

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	°C	20.2	19.5	19.7	19.8
pH	Unidad	7.75	7.18	7.22	7.44
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1320	934	973	1057
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	628	449	506	529
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	178	23	25	31
Coliformes fecales	NMP/100 ml	28000000	3700000	4200000	5000000
Fosfatos	mg/L	31.049	16.539	20.327	23.52
Nitratos	mg/L	3.791	2.365	2.613	2.88

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15

Valores de los parámetros analizados en el Afluente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Junio del 2023.

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	°C	22.4	21.8	22.1	22.2
pH	Unidad	7.82	7.35	7.4	7.62
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1240	830	860	909
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	590	420	465	495
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	206	21	23	30
Coliformes fecales	NMP/100 ml	17000000	2900000	4000000	4800000
Fosfatos	mg/L	32.663	18.56	20.69	21.58
Nitratos	mg/L	5.27	3.54	3.66	3.92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Valores de los parámetros analizados en el Afluente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Julio del 2023.

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	°C	20.7	18.8	19.4	19.9
pH	Unidad	7.43	7.22	7.29	7.33
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1280	826	902	968
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	668	479	496	525
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	197	27	31	35
Coliformes fecales	NMP/100 ml	18000000	2700000	3400000	3600000
Fosfatos	mg/L	29.58	18.21	19.53	22.08
Nitratos	mg/L	4.36	2.95	3.18	3.35

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

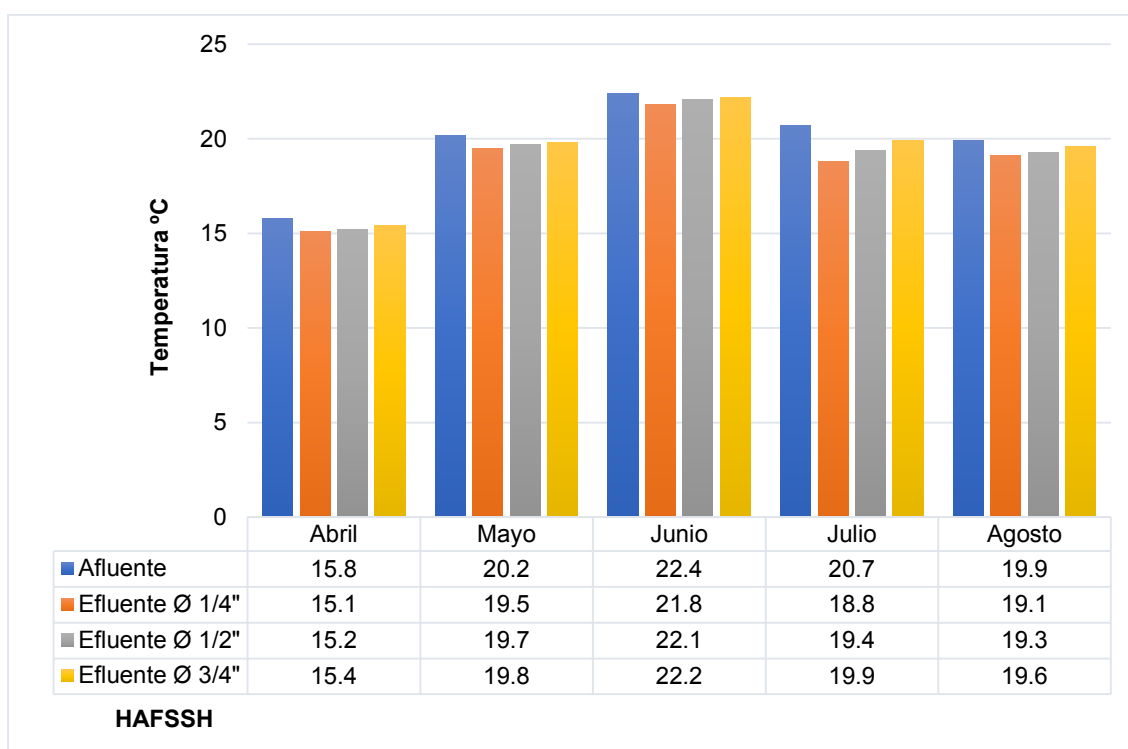
Valores de los parámetros analizados en el Afluente (Sedimentador) y Efluentes de los HAFSSH con gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" – Agosto del 2023.

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	°C	19.9	19.1	19.3	19.6
pH	Unidad	8.02	7.85	7.91	7.94
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1180	772	815	837
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	690	505	528	560
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	182	23	26	28
Coliformes fecales	NMP/100 ml	25000000	3500000	4000000	4600000
Fosfatos	mg/L	26.5	16.71	17.92	18.33
Nitratos	mg/L	3.52	2.4	2.54	2.71

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Análisis de la variación de Temperatura (°C) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



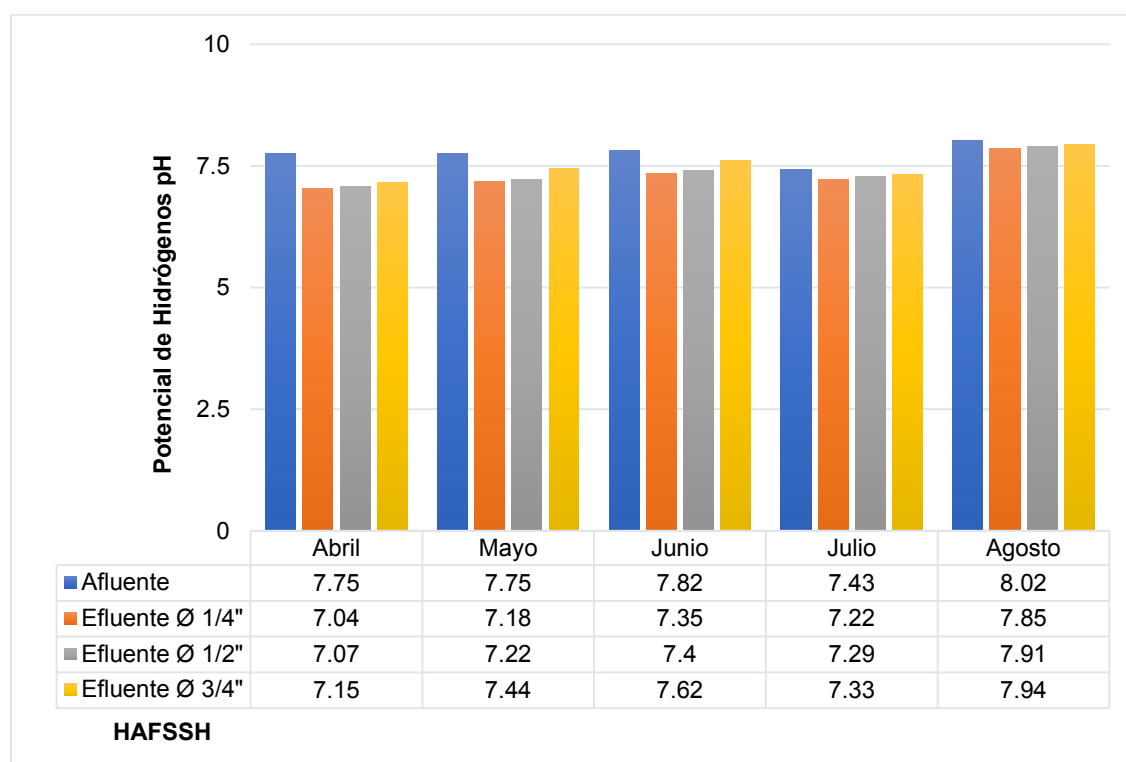
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Según los valores de temperatura reportados cada mes, no se muestran variaciones diferenciadas mayores a 1 °C durante. Aparentemente la temperatura es uniforme, pero si la vemos por mes, en mayo la temperatura se reportó baja de casi 15.1 °C a diferencia de los otros meses. Mientras que el reporte de temperatura mayor fue en el mes de junio de casi 22.4 °C. Por otro lado, comparándolas entre afluente y efluente es ligera la diferencia en todos los meses.

Las causas podrían deberse a la hora, los factores climáticos y las condiciones de los reactores; también repercute el horario de toma de muestras.

Figura 20

Análisis de la variación de Potencial de Hidrógenos (pH) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



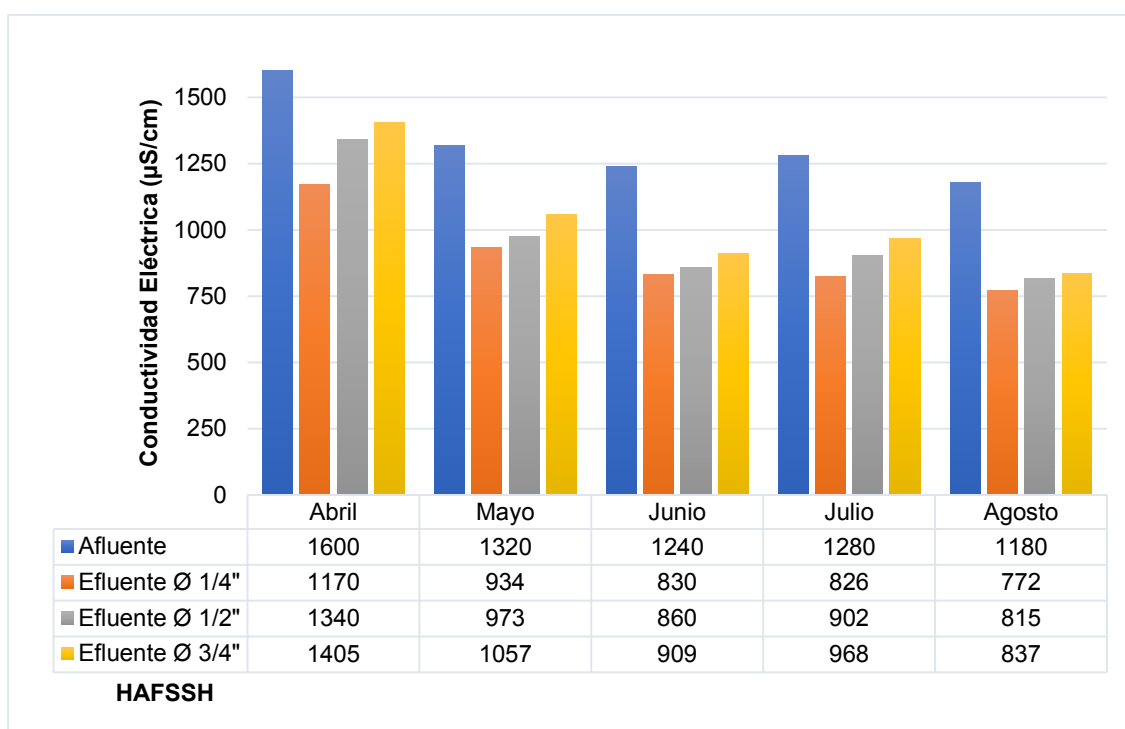
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Igualmente los valores de pH en las aguas residuales tratadas mantienen valores no diferenciados. En el mes de abril, los resultados de los efluentes casi llegaron a valores de pH neutro casi llegaron a con relación al valor del Afluente. En el mes de agosto se superó el pH hasta casi de más de 8. Casi todos los valores están ligeramente alcalinas; así mismo, la variación entre Afluente y Efluente es ligeramente considerable y si hay reducción del pH, pero no es significativo. Esto significa que las plantas afectan de alguna manera la reducción de la concentración de iones de hidrógeno y las condiciones de funcionamiento del sistema, como la grava y los microorganismos.

Un valor de pH menor a 7 significa que es más ácida, y un valor mayor a 7 significa que es más alcalina; mientras que un valor de pH 7 es neutro.

Figura 21

Análisis de la variación de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



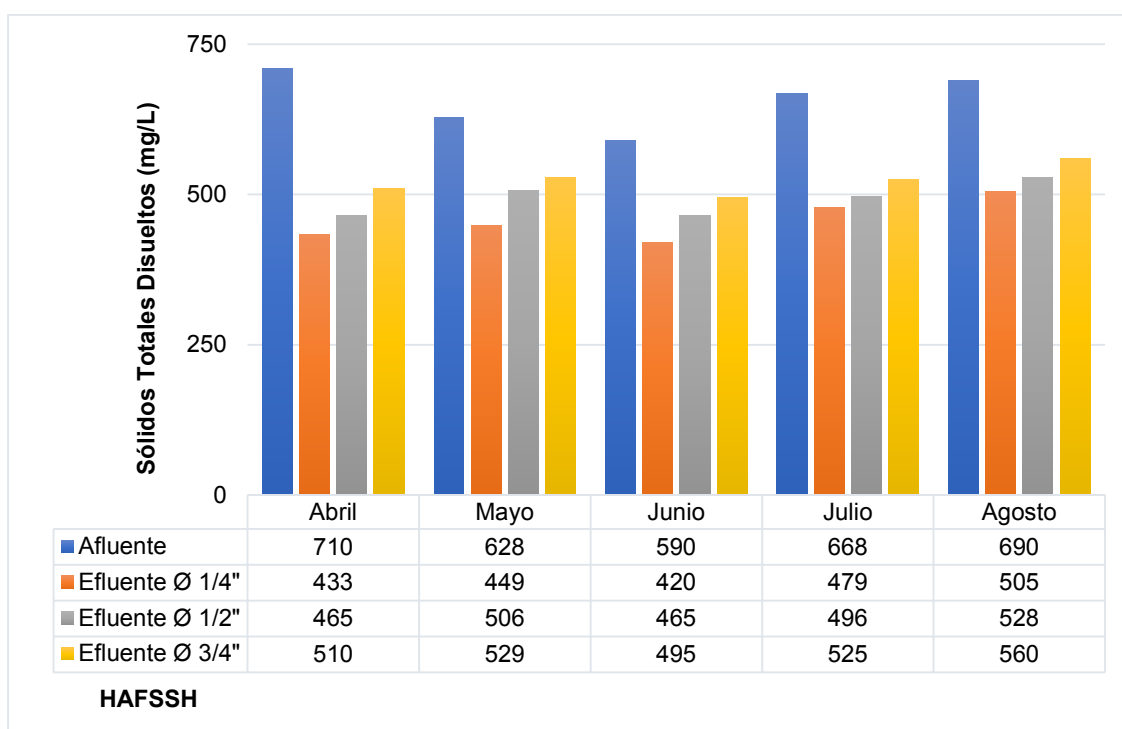
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: En la evaluación de este parámetro se observa la diferencia por meses; y entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH). Entonces podemos decir que si hay diferencia en cuanto a remoción de la conductividad eléctrica entre Afluente y Efluentes. En el caso de comparación de si hay o no variación entre los efluentes, si se puede afirmar que hubo diferencia y donde se removi6 más fue en el humedal (HAFSSH) con sustrato de Ø1/4" o el de menor diámetro. En el mes de abril fue mayor la concentración de conductividad eléctrica a diferencia del resto de los meses y ligeramente bajo en el mes de agosto.

La conductividad eléctrica mide la concentración de sales disueltas en el agua, depende del pH y la temperatura.

Figura 22

Análisis de la variación de Sólidos Totales Disueltos TDS (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



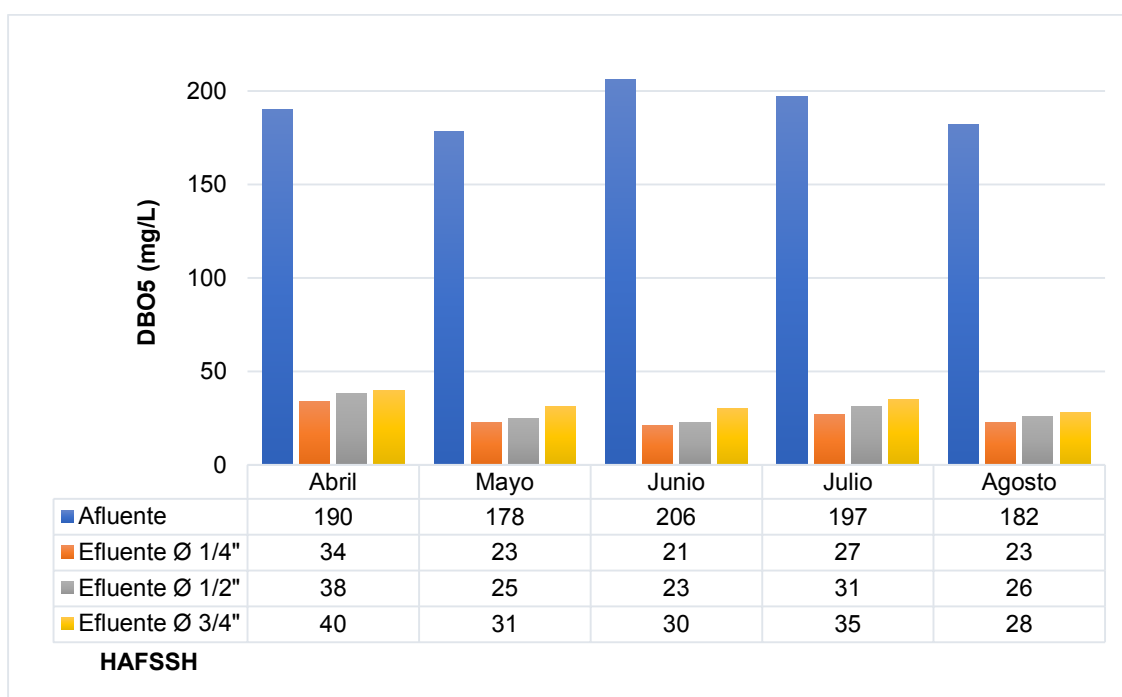
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: La concentración de sólidos totales disueltos en el Afluente de todos los muestreos es diferenciado, comparando con la concentración en los Efluentes con sustrato de Ø 1/4" que es casi más de 250 mg/L. Hay diferencia por meses; y entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH). Entonces podemos decir que sí hay variación diferenciada en cuanto a remoción de este parámetro; siendo, el valor mayor del Afluente en el mes de abril con 710 mg/L.

Los sólidos totales disueltos (TDS) incluyen sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en agua. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los TDS están compuestos principalmente de iones.

Figura 23

Análisis de la variación de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO5 (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



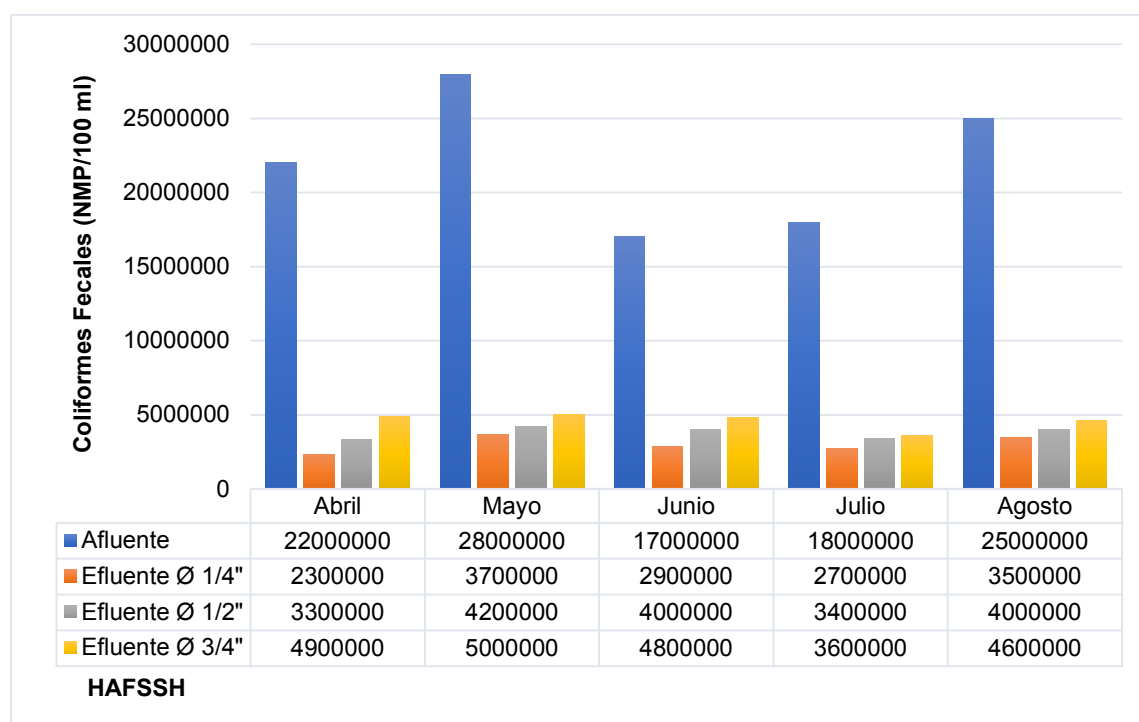
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Según el gráfico de barras evidentemente, la concentración de la Demanda Biológica de Oxígeno DBO5 en el Afluente de todos los muestreos es muy variado en relación a los Efluentes de los humedales por mes. Hay diferencia por meses entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH), entonces podemos decir que sí hay variación diferenciada en cuanto a remoción de la DBO5; siendo, el valor mayor del Afluente en el mes de junio con 206 mg/L. En cuanto refiere a la concentración reducida de los Efluentes, no hay variación significativa entre sí, pues los valores oscilan entre 21 a 40 mg/L de DBO5.

El valor de la DBO5, indica la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante 5 días a una temperatura de 20 °C para la degradación aeróbica de las sustancias contenidas en el agua.

Figura 24

Análisis de la variación de Coliformes Fecales (NMP/100 ml) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



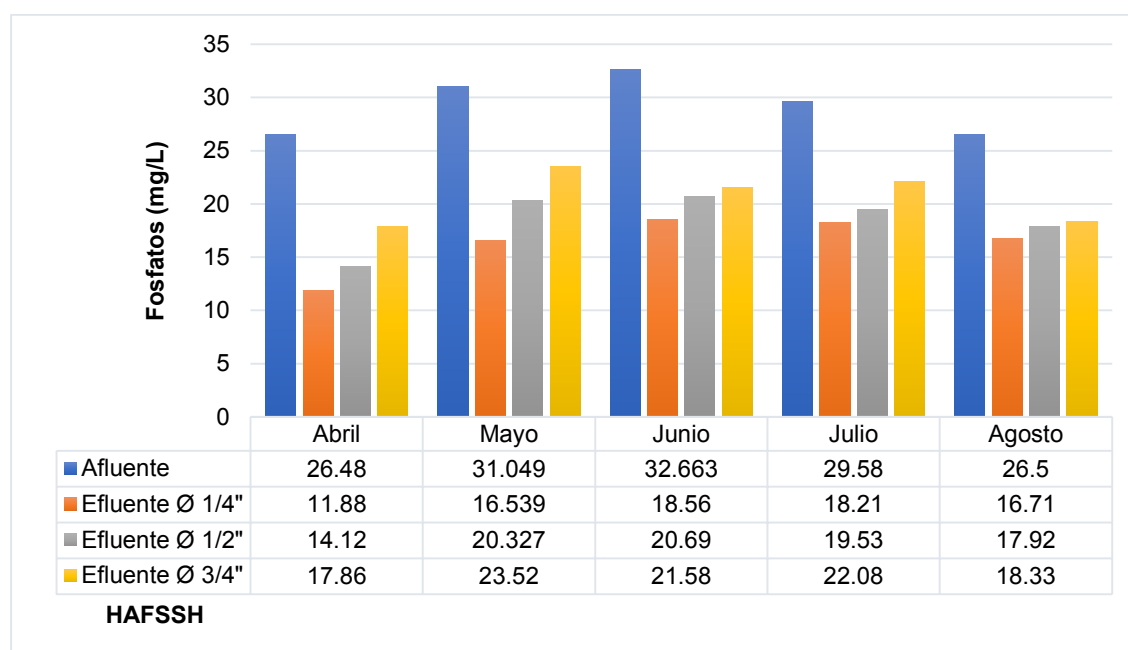
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Del mismo modo, en el gráfico de barras se muestra que evidentemente la concentración de Coliformes Fecales en el Afluente de todos los muestreos es muy variado en relación a los Efluentes de los humedales por mes. Hay diferencia por meses entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH), entonces podemos decir que sí hay variación diferenciada en cuanto a remoción de coliformes fecales; siendo, el valor mayor del Afluente en el mes de mayo con 28×10^6 NMP/100 ml. En cuanto refiere a la concentración reducida entre los Efluentes, no hay variación significativa entre sí, pues los valores oscilan entre 23×10^5 a 50×10^5 NMP/100 ml de Coliformes Fecales.

Los coliformes fecales son un grupo de coliformes que pueden fermentar la lactosa a 44 o 45 °C (la OMS recomienda el término coliformes tolerantes al calor). Las pruebas de coliformes fecales son bastante sencillas para evaluar la contaminación fecal del agua.

Figura 25

Análisis de la variación de Fosfatos (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



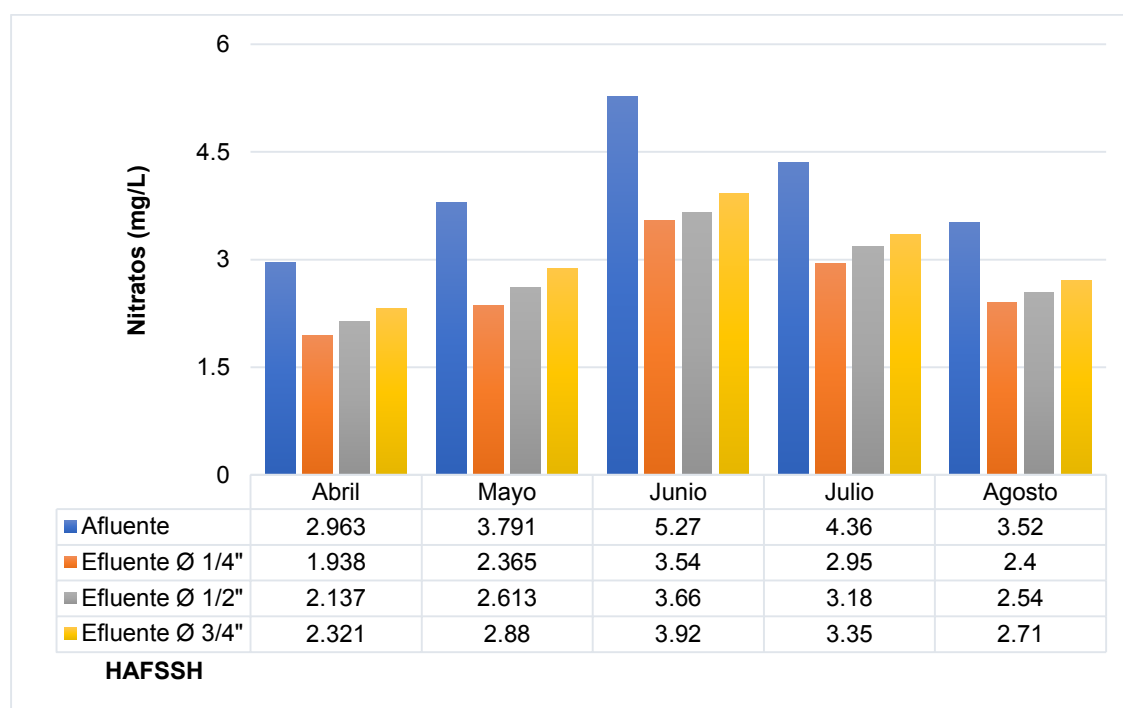
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: En este gráfico de barras se muestra que la concentración de Fosfatos en el Afluente de todos los muestreos es ligeramente variado en relación a los Efluentes de los humedales por mes. Hay diferencia por meses entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH), entonces podemos decir que sí hay variación considerable en cuanto a remoción de Fosfatos; siendo, el valor mayor del Afluente en el mes de junio con 32.662 mg/L. En cuanto refiere a la concentración reducida entre los Efluentes, la variación es ligera entre sí, pues los valores oscilan entre 11.88 a 23.52 mg/L de Fosfatos.

Los compuestos de fosfato que se encuentran en las aguas residuales o que entran directamente en las aguas superficiales provienen de fertilizantes, excrementos de humanos y animales, agentes de lavado y limpieza.

Figura 26

Análisis de la variación de Nitratos (mg/L) en el Afluente y Efluentes durante los meses de investigación – 2023.



Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Según los valores de la concentración de Nitratos en el Afluente en todos los muestreos, es ligeramente variado en relación a los Efluentes de los humedales por mes. Hay diferencia por meses entre el Afluente (sedimentador integrado) y los Efluentes (HAFSSH), entonces podemos decir que sí hay variación considerable en cuanto a remoción de Nitratos; siendo, el valor mayor del Afluente en el mes de junio con 5.24 mg/L. En cuanto refiere a la concentración reducida entre los Efluentes, la variación es ligera entre sí, pues los valores oscilan entre 1.938 a 3.92 mg/L de Nitratos.

El nitrógeno es un contaminante de las aguas residuales que debe eliminarse por varias razones: reduce la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas superficiales, es tóxico para los ecosistemas acuáticos, es una amenaza para la salud pública y, junto con el fósforo, es responsable del crecimiento excesivo de organismos que eutrofizan el medio.

Tabla 18

Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Abril 2023.

Parámetros	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	4.43%	3.80%	2.53%
pH	9.16%	8.77%	7.74%
Conductividad eléctrica	26.88%	16.25%	12.19%
Sólidos totales disueltos (TDS)	39.01%	34.51%	28.17%
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	82.11%	80.00%	78.95%
Coliformes fecales	89.55%	85.00%	77.73%
Fosfatos	55.14%	46.68%	32.55%
Nitratos	34.59%	27.88%	21.67%

Tabla 19

Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Mayo 2023.

Parámetros	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	3.47%	2.48%	1.98%
pH	7.35%	6.84%	4.00%
Conductividad eléctrica	29.24%	26.29%	19.92%
Sólidos totales disueltos (TDS)	28.50%	19.43%	15.76%
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	87.08%	85.96%	82.58%
Coliformes fecales	86.79%	85.00%	82.14%
Fosfatos	46.73%	34.53%	24.25%
Nitratos	37.62%	31.07%	24.03%

Tabla 20

Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Junio 2023.

Parámetros	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	2.68%	1.34%	0.89%
pH	6.01%	5.37%	2.56%
Conductividad eléctrica	33.06%	30.65%	26.69%
Sólidos totales disueltos (TDS)	28.81%	21.19%	16.10%
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	89.81%	88.83%	85.44%
Coliformes fecales	82.94%	76.47%	71.76%
Fosfatos	43.18%	36.66%	33.93%
Nitratos	32.83%	30.55%	25.62%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21

Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Julio 2023.

Parámetros	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	9.18%	6.28%	3.86%
pH	2.83%	1.88%	1.35%
Conductividad eléctrica	35.47%	29.53%	24.38%
Sólidos totales disueltos (TDS)	28.29%	25.75%	21.41%
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	86.29%	84.26%	82.23%
Coliformes fecales	85.00%	81.11%	80.00%
Fosfatos	38.44%	33.98%	25.35%
Nitratos	32.34%	27.06%	23.17%

Tabla 22

Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH - Agosto 2023.

Parámetros	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal		
	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"
Temperatura	4.02%	3.02%	1.51%
pH	2.12%	1.37%	1.00%
Conductividad eléctrica	34.58%	30.93%	29.07%
Sólidos totales disueltos (TDS)	26.81%	23.48%	18.84%
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	87.36%	85.71%	84.62%
Coliformes fecales	86.00%	84.00%	81.60%
Fosfatos	36.94%	32.38%	30.83%
Nitratos	31.82%	27.84%	23.01%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

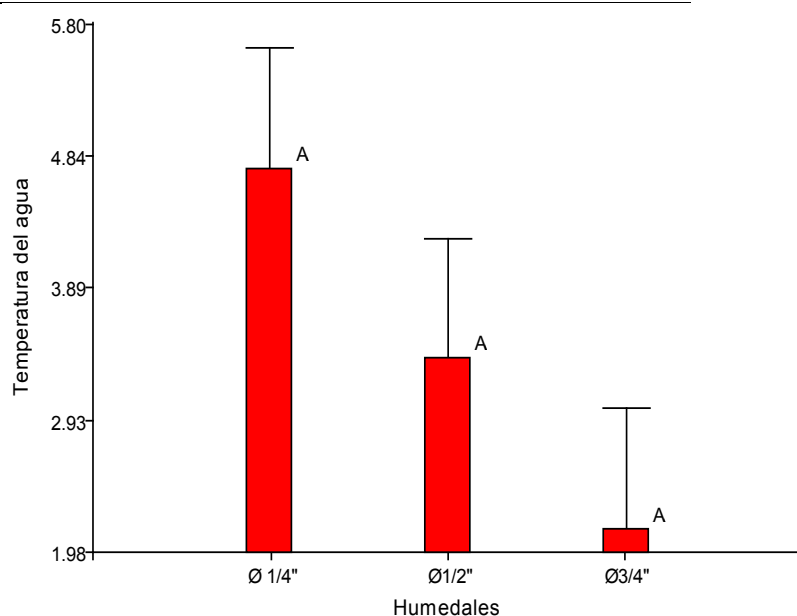
ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción de la Temperatura °C, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	16.94	2	8.47	2.26	0.1468
Error	44.97	12	3.75		
Total	61.91	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 3.7471, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.	
Ø 1/4"	4.76	5	0.87	A
Ø 1/2"	3.38	5	0.87	A
Ø 3/4"	2.15	5	0.87	A



Interpretación: De acuerdo a los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.1468, entonces $p > 0.05$ y por ello se acepta la H_0 ; por tanto, los valores del % de remoción de la Temperatura en los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", no son significativamente diferentes.

Según el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción de la Temperatura en los 03 humedales si son diferentes, pero estadísticamente son semejantes; de tal forma, que fue mejor la remoción de Temperatura en el humedal de Ø 1/4" con 4.76%, seguido por el de Ø 1/2" con 3.38% y aparentemente menor en el de Ø 3/4" con 2.15%, tal como muestran las tablas y el gráfico.

Tabla 24

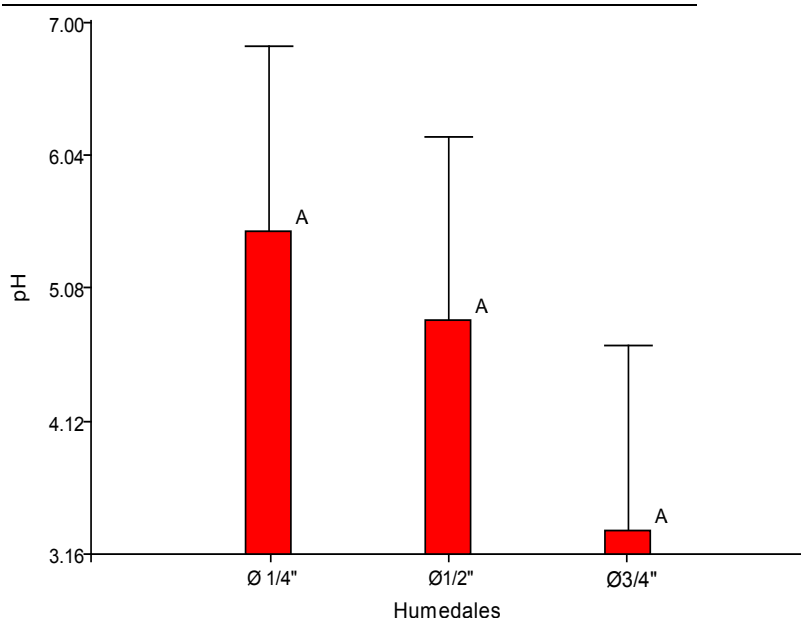
ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción del Potencial de Hidrógenos (pH), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	12.34	2	6.17	0.70	0.5166
Error	106.00	12	8.83		
Total	118.33	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 8.8332, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.	
Ø 1/4"	5.49	5	1.33	A
Ø 1/2"	4.85	5	1.33	A
Ø 3/4"	3.33	5	1.33	A



Interpretación: De acuerdo a los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.5166, entonces $p > 0.05$ y por ello se acepta la H_0 ; por tanto, los valores del % de remoción del pH en los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", no son significativamente diferentes.

Según el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción del pH en los 03 humedales si son diferentes, pero estadísticamente son semejantes; de tal forma, que fue mejor la remoción de pH en el humedal de Ø 1/4" con 5.49%, seguido por el de Ø 1/2" con 4.85% y aparentemente menor en el de Ø 3/4" con 3.33%, tal como muestran las tablas y el gráfico.

Tabla 25

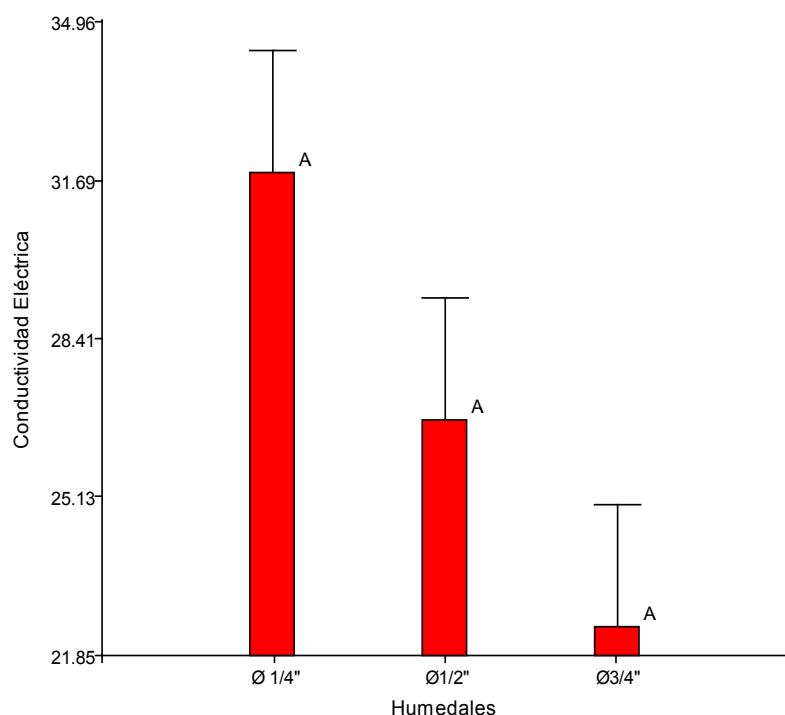
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Conductividad Eléctrica, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	221.29	2	110.65	3.48	0.0643
Error	381.60	12	31.80		
Total	602.89	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 31.8000, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.	
Ø 1/4"	31.85	5	2.52	A
Ø 1/2"	26.73	5	2.52	A
Ø 3/4"	22.45	5	2.52	A



Interpretación: Según los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.0643, entonces $p > 0.05$ y por ello se acepta la H_0 ; por tanto, los valores del % de remoción de la Conductividad Eléctrica en los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", no son significativamente diferentes.

Según el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción de la Conductividad Eléctrica en los 03 humedales son diferentes, pero estadísticamente son semejantes; de tal forma, que fue mejor la Remoción de la Conductividad Eléctrica en el humedal de Ø 1/4" con 31.85%, seguido por el de Ø 1/2" con 26.73% y menor en el de Ø 3/4" con 22.45%.

Tabla 26

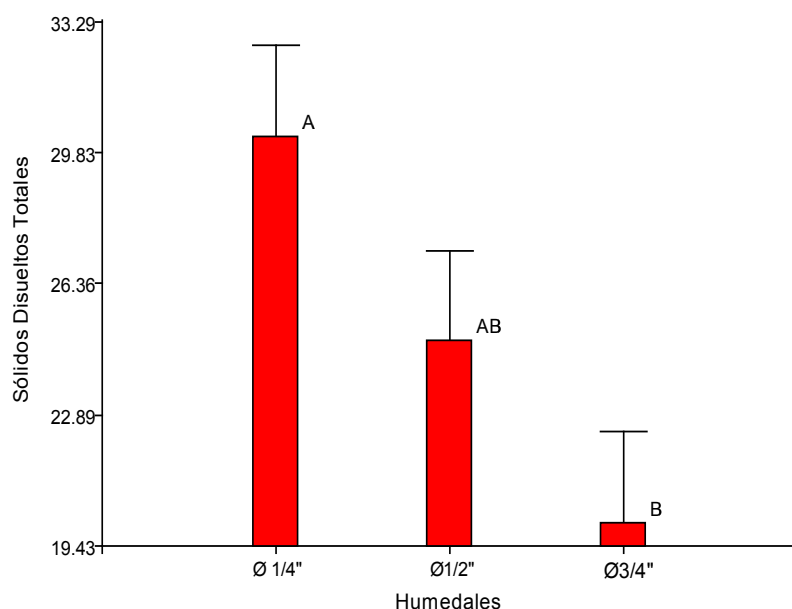
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Sólidos Totales Disueltos, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	261.83	2	130.91	4.63	0.0324
Error	339.57	12	28.30		
Total	601.40	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 28.2975, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.		
Ø 1/4"	30.28	5	2.38	A	
Ø 1/2"	24.87	5	2.38	A	B
Ø 3/4"	20.06	5	2.38		B



Interpretación: De acuerdo a los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.0324, entonces $p < 0.05$ y por ello se rechaza la H_0 ; por tanto, hay evidencia de que los valores del % de remoción de Sólidos Disueltos Totales es diferente en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", estadísticamente son significativos; que el % de remoción, al menos en uno de los humedales es diferente del otro.

Al realizar el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción del TDS en los 03 humedales son diferentes, al igual que estadísticamente. También se puede observar que el mayor % de remoción del TDS fue mejor en el humedal de Ø 1/4" con 30.28%, y menores en el de Ø 1/2" y Ø 3/4" con 24.87% y 20.06% respectivamente.

Tabla 27

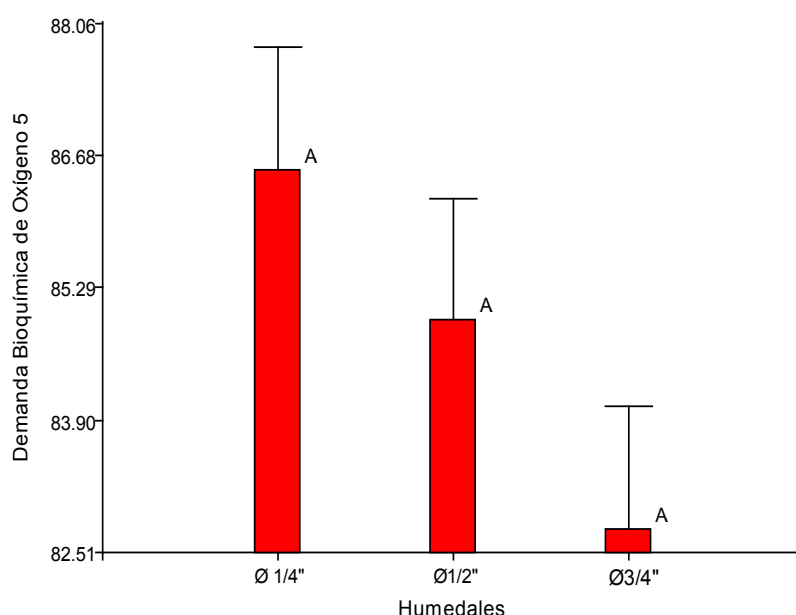
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Demanda Biológica de Oxígeno, en humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	35.77	2	17.88	2.18	0.1557
Error	98.45	12	8.20		
Total	134.21	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 8.2038, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.	
Ø 1/4"	86.53	5	1.28	A
Ø 1/2"	84.95	5	1.28	A
Ø 3/4"	82.76	5	1.28	A



Interpretación: De acuerdo a los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.1557, entonces $p > 0.05$ y por ello se acepta la H_0 ; por tanto, los valores del % de remoción de la BDO5 en los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", no son significativamente diferentes.

Según el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción de la DBO5 en los 03 humedales son diferentes, pero estadísticamente son semejantes. También se puede observar que el mayor % de Remoción del DBO5 fue mejor en el humedal de Ø 1/4" con 86.53%, y menores en el de Ø 1/2" y Ø 3/4" con 84.95% y 82.76% respectivamente.

Tabla 28

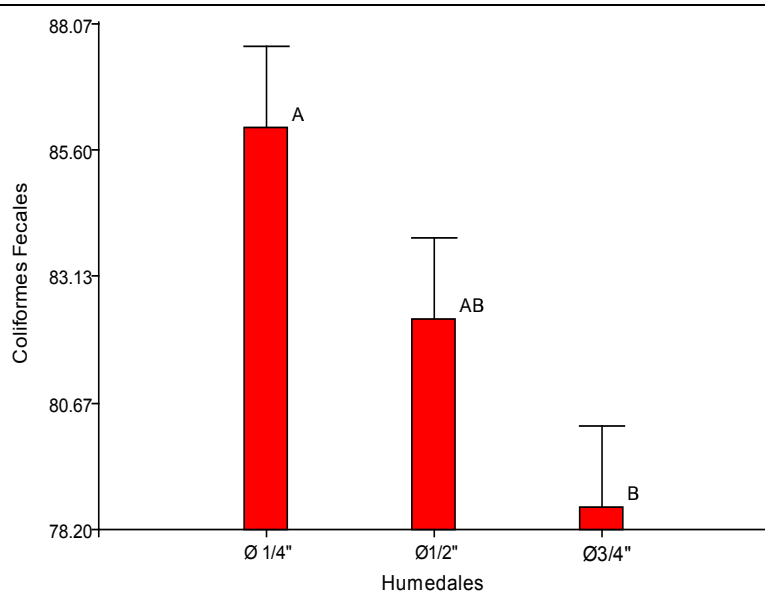
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Coliformes Fecales, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	137.27	2	68.64	5.59	0.0193
Error	147.47	12	12.29		
Total	284.75	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 12.2893, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.		
Ø 1/4"	86.06	5	1.57	A	
Ø 1/2"	82.32	5	1.57	A	B
Ø 3/4"	78.65	5	1.57		B



Interpretación: Tal como se muestran en los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.0193, entonces $p < 0.05$ y por ello se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 . Al comparar los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", según el % de remoción de Coliformes Fecales, se halló que hay evidencia que existe diferencia entre sí o estadísticamente son significativos.

Al realizar el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción de Coliformes Fecales en los 03 humedales son diferentes, al igual que estadísticamente. También se puede observar que el mayor % de remoción de Coliformes Fecales fue en el humedal de Ø 1/4" con 30.28%, y menores en el de Ø 1/2" y Ø 3/4" con 24.87% y 20.06% respectivamente.

Tabla 29

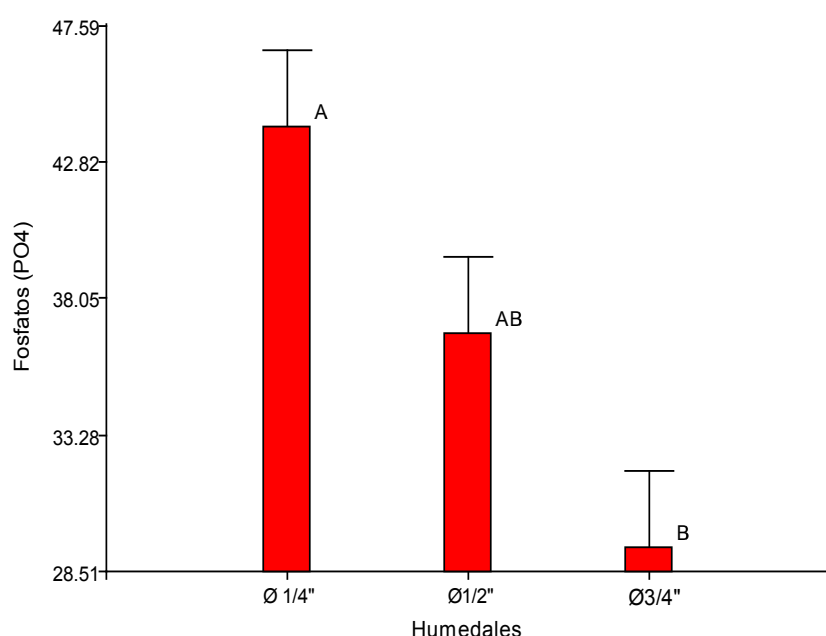
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Fosfatos PO_4^{3-} (mg/L), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	540.56	2	270.28	7.75	0.0069
Error	418.62	12	34.89		
Total	959.18	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 34.8852, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.		
Ø 1/4"	44.09	5	2.64	A	
Ø 1/2"	36.85	5	2.64	A	B
Ø 3/4"	29.38	5	2.64		B



Interpretación: Según los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor = 0.0069, entonces $p < 0.05$ y por ello se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 . Al comparar los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", según el % de remoción de Fosfatos, se halló que hay evidencia que existe diferencia entre sí o estadísticamente son significativos.

Al realizar el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción del Fosfato en los 03 humedales son diferentes, al igual que estadísticamente. También se puede observar que el mayor % de remoción del Fosfato fue en el humedal de Ø 1/4" con 44.09%, y menores en el de Ø 1/2" y Ø 3/4" con 36.85% y 29.38% respectivamente, tal como muestran las tablas y el gráfico.

Tabla 30

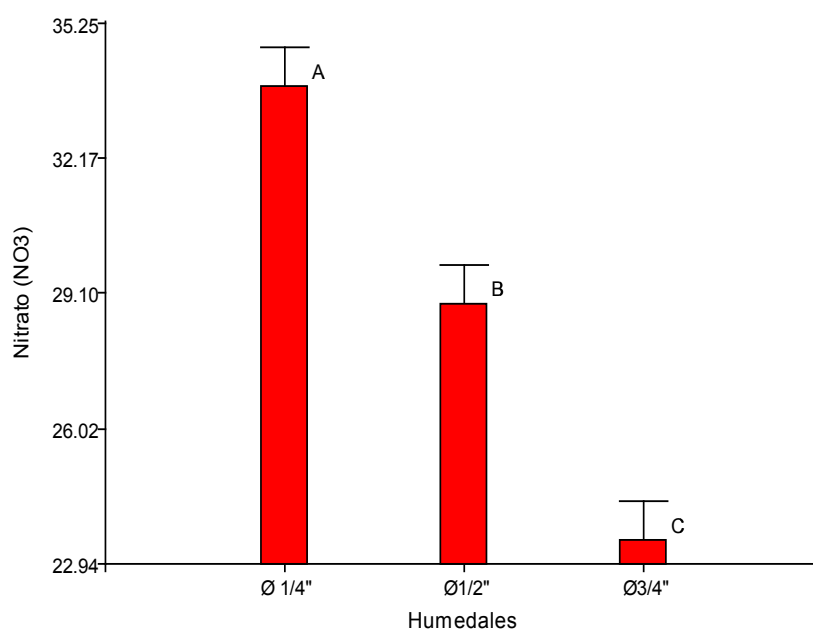
ANVA y Test de Duncan para % de Remoción de Nitratos NO_3 (mg/L), en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de $\varnothing$ 1/4", $\varnothing$ 1/2", $\varnothing$ 3/4".

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Humedales	267.44	2	133.72	36.76	<0.0001
Error	43.65	12	3.64		
Total	311.09	14			

Test: Duncan, Alfa = 0.05

Error: 3.6378, gl: 12

Humedales	Medias	n	E.E.		
$\varnothing$ 1/4"	33.84	5	0.85	A	
$\varnothing$ 1/2"	28.88	5	0.85		B
$\varnothing$ 3/4"	23.50	5	0.85		C



Interpretación: Según los resultados del Análisis de la Varianza (ANVA) el p-valor < 0.0001, entonces $p < 0.05$ y por ello se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 . Al comparar los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de $\varnothing$ 1/4", $\varnothing$ 1/2", $\varnothing$ 3/4", según el % de remoción de Nitratos, se halló que hay evidencia que existe diferencia entre sí o estadísticamente son significativos.

Al realizar el test de Duncan con un nivel de significancia de 0.05, numéricamente las medias del % de remoción de Nitratos en los 03 humedales son diferentes, al igual que estadísticamente. También se puede observar que el mayor % de remoción del Nitratos fue en el humedal de $\varnothing$ 1/4" con 33.84%, y menores en el de $\varnothing$ 1/2" y $\varnothing$ 3/4" con 28.88% y 23.50% respectivamente, tal como muestran las tablas y el gráfico.

4.3. Discusión de resultados

Según el objetivo específico de la presente investigación: Evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal, planta de tratamiento de aguas residuales PTAR “La Totorá”, Ayacucho 2023, los resultados indican que la granulometría del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH); Donde, numéricamente los valores son muy significativos (para algunos parámetros); pero, en valores porcentuales (%) y entre humedales, estadísticamente no es significativo.

Características constructivas de los Humedales: Se construyeron seis (06) reactores biológicos o humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en un área de $3.40 \times 1.73 = 5.88 \text{ m}^2$, cada HAFSSH con dimensiones $L=1.20$, $A=0.45$, $H=0.45$; área superficial útil de 0.54 m^2 , pendiente 0.5%; para ello, se utilizó como referente lo que indica Tabla 6 respecto a la Relación Longitud – Ancho 2:1 y otras consideraciones. Las unidades experimentales HAFSSH fueron sembrados con *Typha angustifolia* “totorá”. De 06 humedales en funcionamiento, 03 son alternos para periodos de reposo o casos de emergencia por acumulación de sedimentos y algas, obstrucción de goteros, mantenimiento, etc. En el área útil de los humedales se utilizó piedra de $\varnothing 2''$ para los extremos (zona de amortiguamiento) y grava de $\varnothing \frac{1}{4}''$ (0.635 cm), $\varnothing \frac{1}{2}''$ (1.27 cm), $\varnothing \frac{3}{4}''$ (1.905 cm) para el centro (medio granular o principal), ambos como medio filtrante.

Los resultados de volumen útil y caudal de operación se realizaron teniendo en cuenta la Tabla 6, donde los intervalos del TRH están en un intervalo de 4 a 5 días; teniendo en cuenta que, nuestro dimensionamiento fue de manera empírica por tratarse de un trabajo de investigación se tomó como referencia dicha tabla y se hicieron ensayos In Situ de ajustes hasta estandarizar u homogenizar el aforo para cada humedal, donde el volumen de aforo fue de 50 ml y el tiempo de llenado ya estandarizado de 19.20 minutos para los 03 HAFSSH. Finalmente con estos datos se hicieron los cálculos para Volumen Útil y Caudal de Operación, con resultados de 0.24 m^3 y 18.76 L/día ($0.0188 \text{ m}^3/\text{día}$) respectivamente.

A partir de los ensayos del análisis granulométrico como diámetro efectivo (D_e), coeficiente de curvatura (C_c), coeficiente de uniformidad (C_u) Tabla 10 y los valores de referencia como tamaño efectivo, conductividad hidráulica, porosidad (n) Tabla 7, se pudo calcular interpolando la Porosidad de nuestros materiales utilizados como sustrato en los humedales (HAFSSH), donde los valores de Porosidad para las gravas de $\varnothing \frac{1}{4}''$, $\varnothing \frac{1}{2}''$, $\varnothing \frac{3}{4}''$ fueron de 32.64%, 35.09%, 38.14% respectivamente. Con los valores de porosidad calculada se procedió a calcular el tiempo de retención hidráulica TRH en cada humedal, obteniendo resultados para los HAFSSH con gravas de $\varnothing \frac{1}{4}''$, $\varnothing \frac{1}{2}''$, $\varnothing \frac{3}{4}''$ valores de TRH de 4.23, 4.54, 4.94 días respectivamente, donde el mayor TRH es en el HAFSSH de $\varnothing \frac{3}{4}''$.

Los resultados de los ensayos del análisis granulométrico son como sigue:

HAFSSH	mm	De (D ₁₀) mm	Cu	Cc
Ø 1/4"	6.35	3.72	1.82	1.02
Ø 1/2"	12.7	8.23	1.94	1.1
Ø 3/4"	19.05	17.13	1.32	1.06

A partir de ello, deducimos que de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) nuestro material como sustrato se clasifica como GP (Gravas mal graduadas: mezclas de grava y arena con poco o nada de finos), pues cumple con los requisitos de $Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$ para este criterio de clasificación.

Según la investigación de Li et al. (2022), los lechos con partículas más grandes y menos porosidad retienen el agua durante más tiempo en comparación con aquellos con partículas más pequeñas y una mayor porosidad. Asimismo, se encontró que los lechos con partículas más pequeñas y una porosidad más alta presentan una mayor capacidad para atrapar sustancias y favorecen una tasa más rápida de intercambio de nutrientes, lo que, a su vez, mejora la eficiencia en la eliminación de contaminantes.

Por otro lado, según Zhang et al. (2021), los sustratos que presentan partículas de mayor tamaño exhiben una mayor capacidad de dejar pasar el agua y pueden favorecer el movimiento hidráulico en los humedales, lo que contribuye a mejorar la eficacia en el proceso de tratamiento. Según Du et al. (2019), la eficiencia de la eliminación puede ser influenciada por el tamaño de partículas del sustrato, la porosidad y la capacidad de adsorción del sustrato.

En resumen, el tamaño de partículas del sustrato es un factor clave en la granulometría del sustrato para la remoción de contaminantes en los humedales de flujo subsuperficial horizontal, influye en la distribución de los poros, la capacidad de retención de contaminantes, el tiempo de residencia y la permeabilidad al agua del sustrato; del mismo modo, la porosidad influye en la capacidad de retención de los contaminantes y la distribución del flujo hidráulico en el sustrato; así mismo, la permeabilidad del sustrato influye en la eficiencia de la remoción de contaminantes y la capacidad de retención del sustrato.

De acuerdo a nuestros resultados de remoción en los muestreo ubicados en la salida de los efluentes de HAFSSH (P1, P2, P3) Figura 16, los parámetros a evaluar In Situ son la temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos (TDS) y en los laboratorios (DBO₅, Coliformes fecales, fosfatos y nitratos). De los resultados de remoción de contaminantes y de acuerdo a la granulometría del sustrato, podemos deducir que efectivamente existe remoción de contaminantes en el humedal con grava Ø 1/4" comparando con los datos de contaminantes que se encuentran en el Sedimentador Integrado N° 2, vemos

como ha influenciado el tamaño de partículas, diámetro efectivo, coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura en la remoción de contaminantes.

De todos los parámetros analizados tal y como muestran las Tablas 18, 19, 20, 21, 22, de Porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en todo el periodo de muestreo para los 03 Efluentes de los HAFSSH por cada mes; además, las Tablas 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 de ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción de contaminantes, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", se observa que para la Temperatura y el pH numéricamente son ligeramente diferentes, pero estadísticamente en los tres humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" son semejantes o no significativos e igualmente para el caso de conductividad eléctrica y demanda biológica de oxígeno DBO5 (pero en % de remoción, el DBO5 tuvo mayor eficiencia con un promedio de 84.75%).

Para el caso de sólidos totales disueltos, coliformes fecales, fosfatos y nitratos numéricamente son diferentes al igual que estadísticamente (al menos uno de los humedales en remoción es diferente al otro) en los tres humedales artificiales.

Respecto a la contrastación de la hipótesis con los resultados, se planteó la H0: que la granulometría del sustrato No influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho; mientras la H1: que la granulometría del sustrato influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho; donde: en la H0: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$; No existe diferencia entre las medias del % de remoción de contaminantes en los HAFSSH; mientras que en la H1: $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$; Existe diferencia entre las medias del % de remoción de contaminantes en los HAFSSH con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".

Las Tablas 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 de ANVA y Test de Duncan en el % de Remoción de contaminantes, en los humedales artificiales de flujo subsuperficial con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", con un nivel de significancia del 0.05 (5%), muestran que en los % de remoción para Temperatura, pH, conductividad eléctrica, demanda biológica de oxígeno presentan p-valores de 0.1468, 0.5166, 0.0643, 0.1557 respectivamente; siendo $p > 0.05$ aceptamos la H0, y decimos que la granulometría del sustrato No influye significativamente en la remoción de Temperatura, pH, conductividad eléctrica, demanda biológica de oxígeno en los 03 humedales de flujo sub superficial horizontal en la PTAR Ayacucho. Entonces los valores del % de remoción de Temperatura, pH, conductividad eléctrica, demanda biológica de oxígeno en los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", no son significativamente diferentes o son semejantes. Para el caso de sólidos totales disueltos, coliformes fecales, fosfatos y nitratos los p-valores fueron de 0.0324, 0.0193, 0.0069, < 0.0001 respectivamente; siendo $p < 0.05$ rechazamos la H0 y decimos que

al comparar los 03 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con grava de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4", según el % de remoción de sólidos totales disueltos, coliformes fecales, fosfatos y nitratos, se halló que hay evidencia que existe diferencia entre sí o estadísticamente son significativos y para nitratos en los 03 humedales son diferentes numéricamente y estadísticamente.

Según Du et al. (2019), los sustratos con partículas más pequeñas y una porosidad mayor demuestran un mayor rendimiento en la eliminación de nitrógeno, mientras que los sustratos con partículas de mayor tamaño y una porosidad menor son más eficaces en la eliminación de fósforo. Chen et al. (2019), demostraron que los sustratos que presentan partículas más grandes y una menor porosidad se muestran más eficaces en el tratamiento de aguas con concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo, los sustratos que poseen partículas más pequeñas y una mayor porosidad, que son más efectivos en el tratamiento de aguas con concentraciones más bajas de nitrógeno y fósforo. Tang et al. (2021), demostraron que los sustratos que presentan una uniformidad en la distribución del tamaño de partículas son más eficaces en la eliminación de nitrógeno y fósforo en comparación con los sustratos que muestran una distribución no homogénea.

Sánchez et al. (2022), Evaluaron el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con “berros” *Nasturtium officinale* en la remoción de materia orgánica, donde para un (TRH) de 5 días con un caudal de circulación de 12.5 ml/min, se obtuvo una eficiencia mínima de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 28.77 % y una máxima eficiencia de 42.20 % todo ello en un rango de temperatura de agua residual de 11 °C y 13 °C. Para un TRH de 7 días con un caudal de 8.93 ml/min, obteniendo una eficiencia mínima de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 32.44 % y una máxima eficiencia de 78.13 % todo ello en un rango de temperatura de agua residual de 11 °C y 15 °C.

Según Lapa (2014), Al evaluar la eficiencia de remoción, la DBO5 fue de 14.86 mg/L, los SST fueron de 66.80 mg/L en el sistema de humedal artificial, esta propuesta contó con tratamientos preliminares (cámara de rejilla y desarenador), tratamiento primario (Imhoff), pos tratamiento (humedal artificial) y lecho de secado

Por otro lado Vela (2018), obtuvo valores del efluente como temperatura de 25 - 25.5 °C, turbidez 9.38 - 6.89 NTU, DBO5 11.45 mg/L - 3.69 mg/L y SST 13 mg/L. a 8 mg/L, la vegetación para el humedal de flujo horizontal fue el *Phragmites australis* "junco"; El efluente de aguas residuales de La Habana tuvo pH 7,05, temperatura 25 °C, turbidez 8,09 NTU, SST 10,4 mg/L, nitratos 0,09 mg/L, fosfatos 4,06 mg/L y DBO5 6,08 mg/L, igual con *Phragmites australis* “caña”. Flores, (2016) en el campus universitario - UNSCH, trabajo de investigación con humedales artificiales para riego dio como resultado valores de DBO5, coliformes fecales y SST de 1,87 mg/L, 401,80 NMP/100 ml y 16,92 mg/L.

Capítulo V

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones

Al evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal, se determinó que la distribución de partículas en el sustrato y la variación en el tamaño influyen en la capacidad de porosidad y permeabilidad del lecho del humedal e inciden en la eficacia para remover contaminantes comparando el afluente (Sedimentador Integrado N° 2) con el efluente de los humedales con sustrato de Ø 3/4", Ø 1/2", Ø 1/4".

Según los ensayos de laboratorio y resultados del coeficiente de uniformidad, nuestros sustratos se clasifican como gravas mal graduadas (GP) por tener mezclas de grava y arena con poco o nada de finos; por ende, la grava de Ø 3/4" por tener mayor porosidad es más permeable lo cual permite acumular, almacenar y se mueva el agua residual a través de ella; mientras que, en el de Ø 1/4" ocurre lo contrario y aparentemente la remoción de contaminantes es mejor pero se obstruyen fácilmente por la presencia de finos, caso que no ocurre con el de Ø 3/4" porque su uniformidad aumenta.

Al evaluar los resultados del coeficiente de curvatura, nuestros sustratos se clasifican como gravas mal graduadas (GP) por tener mezclas de grava y arena con poco o nada de finos; por ende, la grava de Ø 3/4" por tener mayor porosidad es más permeable lo cual permite acumular, almacenar y se mueva el agua residual a través de ella; mientras que, en el de Ø 1/4" ocurre lo contrario y aparentemente la remoción de contaminantes es mejor pero se obstruyen fácilmente por la presencia de finos, caso que no ocurre con el de Ø 3/4" porque la curva granulométrica es constante.

Al evaluar y a partir de los diámetros efectivos fue posible calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura; a su vez permitió calcular la porosidad de las gravas y el tiempo de retención hidráulica del agua residual en los humedales. En el humedal con grava Ø 3/4", el diámetro efectivo es mayor y su tiempo de retención hidráulica de más días, mientras que para el de Ø 1/4" y Ø 1/2" son menores; quiere decir, que cuanto más tiempo permanece el agua en el humedal, hay mayor remoción de contaminantes por la actividad microbiana presente y la vegetación.

5.2. Recomendaciones

Antes de iniciar con el diseño de los humedales, se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del sustrato o la grava, los ensayos respectivos de granulometría y el tipo de humedal artificial por su grado de eficiencia.

Tomar en cuenta las condiciones climáticas como lluvias, temperatura, incidencia de calor y la evapotranspiración, el caudal de ingreso y sus características fisicoquímicas y bacteriológicas del Afluente para el diseño.

En el proceso constructivo de humedales se deberá tener mayor consideración los parámetros de diseño como porosidad, TRH, granulometría y su disposición.

Llevar los registros y la toma de muestras por lo menos 03 a 04 veces al mes, caracterizar los vegetales desde el inicio de la ejecución del proyecto, para conocer la influencia que tienen en el rendimiento de remoción de contaminantes.

Nuestra Universidad, el MVCS y las autoridades involucradas con temas de saneamiento y su normatividad, tener en consideración los altos contenidos de nitratos, fosfatos y coliformes fecales del afluente antes de ingresar a los HAFSSH.

La manipulación de aguas residuales requiere de ciertos criterios debido al alto grado de contaminantes en su composición, se recomienda el uso correcto de EPPs, conocimiento de los protocolos y normas para su muestreo, traslado a los laboratorios y el respectivo análisis. Tener en cuenta las ECAs y LMPs.

5.3. *Trabajos Futuros*

Elaborar proyectos de impacto en diversas comunidades con humedales de flujo superficial y subsuperficial para la remoción de contaminantes, con el apoyo de nuestra universidad y el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento para fortalecer los cambios en cuanto refiere a estos sistemas de fitodepuración.

Trabajos más específicos como la Influencia de la porosidad y conductividad hidráulica en la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes de aguas residuales en comunidades, con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical o combinado.

Análisis de diseño de los modelos de humedales artificiales para depuración en zonas rurales comparando con la Norma Técnica de Diseño: Opciones Tecnológicas para Sistemas de Saneamiento en el Ámbito Rural.

Humedales artificiales en la remoción de materia orgánica en aguas residuales utilizando diferentes vegetales de distintas especies con sustratos de granito piedra de origen volcánico, piedra canto rodado.

Influencia de los ensayos de la granulometría para los sustratos y laboratorios para el análisis de aguas residuales en los efluentes de humedales de flujo subsuperficial horizontal.

Diseño y optimización de sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical para zonas tropicales.

Referencias Bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental (EPA). (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. 13.
- Alarcón, M., Zurita, F., Lara, J., & Vidal. (2018). Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina (1° Ed.). Pontificia Universidad Javeriana Bogotá.
- Asprilla, W., Ramírez, J., & Rodríguez, D. (2020a). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: Comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Revista Ingenierías USB Med*, 11(1), Article 1.
- Asprilla, W., Ramírez, J., & Rodríguez, D. (2020b). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: Comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de la materia orgánica. *Revista Ingenierías USB Med*, 11(1), 65-73.
- Barrera, A., & Osorio, J. (2017). Diseño y operación de un humedal de flujo sub-superficial horizontal para la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales de la industria láctea. *Revista Peruana de Investigación Ambiental*, 95-105.
- Barrera, N., Muñoz, J., Colmenares, J., & Donado, L. (2003). Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias. Research Gate. <https://doi.org/10.13140/2.1.2929.1842>
- Bolaños, A., Huertas, E., Peña, A., & Gómez, J. (2019). Evaluación de la granulometría del sustrato en humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal para la eliminación de materia orgánica y nutriente en aguas residuales urbanas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 347-355.
- Chávez, V., & García, R. (2016). Remoción de arsénico en agua mediante un humedal de flujo sub-superficial horizontal con zeolita como sustrato.
- Chen, H., Liu, Y., & Li, D. (2019). Effect of flow direction and flow pattern on the nitrogen and phosphorus removal performance of a novel horizontal subsurface flow constructed wetland.
- Cieza, A., & Gutiérrez, O. (2016). Evaluación de la eficiencia de un humedal de flujo sub-superficial horizontal en la remoción de coliformes totales y fecales en aguas residuales domésticas. *Revista Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 43-50.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. <https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento-diseno-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales-humedales-artificiales/>
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. McGraw Hill.

- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales (Nelson Antequera Durán).
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Arias, C., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). Humedales para Tratamiento (Vol. 7). Red Panamericana de Sistemas de Humedales. <https://doi.org/10.2166/9781789062526>
- Du, Y., Xu, X., Chen, G., Guo, Y., Wang, J., & Zhang, J. (2019). Effect of particle size and porosity of substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1076-1084.
- Feng, C., Li, F., Li, Y., Li, H., Zhang, X., Li, X., & Li, J. (2020). Effects of substrate particle size and porosity on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An optimization approach.
- Fernández, J., De Miguel, E., De Miguel, J., & Fernández, D. (2001). Manual de Fitodepuración, Filtro de macrófitas en flotación.
- Flores, M. (2014). Aplicación de Humedal Artificial con Macrófitas Flotantes en la Recuperación de Aguas Residuales Domésticas, Moyobamba—San Marín [Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto]. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2390>
- Guo, Y., Chen, G., Guo, R., Li, H., Zhang, J., & Wang, J. (2020). Effect of substrate particle size and porosity on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Technology*, 1222-1232.
- He, W., Qin, L., Liu, Y., & Wu, S. (2020). Influence of substrate size and hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110112>
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. CRC Press.
- Lapa, R. (2014). Propuesta de diseño de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales con fines de riego en la Ciudad Universitaria- UNSCH- 2014. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Li, Y., Wang, J., Lin, X., Wang, H., Li, H., & Li, J. (2022). Purification effects of recycled aggregates from construction waste as constructed wetland filler. *Journal of Water Process Engineering*.
- Mamani, R. (2018). Remoción de hierro y manganeso en agua subterránea mediante un humedal de flujo sub-superficial horizontal con grava como sustrato. *Revista de Investigación Académica*, 1-10.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización: Vol. 2^a* (3^a Ed.) https://www.academia.edu/45529169/ingenieria_de_aguas_residuales_tratamiento_vertido_y_reutilizacion_Volumen_II_Metcalf_y_Eddie

- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2023). Plan Nacional de Saneamiento 2022-2026. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2586305-plan-nacional-de-saneamiento-2022-2026>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2013). Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales—PTAR.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS). (2018). Norma técnica de diseño: Opciones tecnológicas para sistemas de saneamiento en el ámbito rural.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/fiscalizacion-ambiental-aguas-residuales>
- Ortiz, M. (2018). Depuración del efluente de un Rafa en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial utilizando dos medios porosos. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pérez, Y., García, D., & Jauregui-Haza, U. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: Una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), Article 1. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>
- Qian, H., Li, Y., Liu, W., Chen, H., & Wang, H. (2021). Effects of substrate particle size and hydraulic loading rate on pollutant removal in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, 614-625.
- Rabat, J. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración [Maestría, Universidad de Alicante]. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/57213>
- Rivas, A., & Paredes, D. (2014). Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. *Memorias de la Segunda Conferencia anamericana en Sistemas de Humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua*. Morelia, Michoacán, México (1° Ed.).
- Sánchez, V., Sáez, W., Palomino, P., & Manrique, A. (2022). Evaluación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con berros (*Nasturtium officinale*) en la remoción de materia orgánica a escala piloto de las aguas residuales del distrito de Yauli-Huancavelica. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(S1), 641-649.
- Santos, V., & Castillo, R. (2015). Evaluación de un humedal de flujo sub-superficial horizontal con diferentes tipos de sustrato en la remoción de contaminantes en aguas residuales. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 1-11.
- Tang, C., Li, F., Li, Y., Li, H., Zhang, X., & Li, J. (2021). Particle size distribution effects on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 397-405.

- Tavera, M., & Rivas, M. (2014). Evaluación de la eficiencia de un humedal de flujo sub-superficial horizontal en la remoción de contaminantes en aguas residuales de una urbanización en Lima. *Revista de Investigación en Tecnología de Alimentos y Medio Ambiente*.
- Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). (2018). IV Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua.
- Vela, I. (2018). Eficiencia de un Tanque Imhoff-HA a escala, para mejorar la calidad de las aguas servidas municipales del distrito de Habana, Moyobamba. Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto.
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., Vidal, G., Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: Reflexiones. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(3), 19-35.
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). Humedales construidos: Diseño y operación (1° Ed.). Universidad de Concepción. <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1779>
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. 1059-1103.
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation.
- Wang, S., Wang, Z., Zou, Y., Li, X., & Lu, Q. (2018). Effects of substrate granulometry on bacterial community structure in constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 16747-16756.
- Wu, X., Wang, H., Li, J., Li, F., Chen, H., Li, Y., & Li, X. (2019). Enhanced nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands with high-porosity substrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 17746-17754.
- Xue, L., Liang, S., Li, G., & Li, L. (2019). A review of the effect of substrate granulometry on the performance of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 1-8.
- Yang, Y., Zhang, J., Ni, L., Cui, Y., & Wang, D. (2018). Effect of substrate permeability on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands: A laboratory experiment. *Water Science and Technology*, 2431-2438.
- Zhang, X., Li, F., Li, Y., Wei, X., Li, H., Li, X., & Li, J. (2021). Influence of substrate size on hydraulic conductivity and pollutant removal performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*.
- Zhu, J., Liu, C., Wu, H., Wu, Y., Zhang, Q., & Hu, Y. (2020). Effect of hydraulic retention time and substrate permeability on the performance of constructed wetlands in treating wastewater.
- Zou, Y., Wang, Z., Wang, S., & Lu, Q. (2021). Effects of porosity of substrates on flow behavior and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands.

Lista de Abreviaturas

HA: Humedal Artificial

HAFSSH: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica

AR: Agua Residual

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

DBO5: Demanda Biológica de Oxígeno (5 días a 20°C)

pH: Potencial de hidrógenos

NO₃⁻: Nitrato

PO₄³⁻: Fósforo

TDS: Sólidos Totales Disueltos

mg/L: Miligramos/Litro

NMP: Número más probable

ANVA: Análisis de varianza

(LMP): Límite máximo permisible

(ECA): Estándares de calidad ambiental

(PNSR): Programa nacional de saneamiento rural

De: Diámetro efectivo

Cc: Coeficiente de curvatura

Cu: Coeficiente de uniformidad

Glosario

Agua residual: Agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión.

Afluente: Agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

Anaerobio: Condición en la cual no hay presencia de aire u oxígeno libre.

Coliformes: Bacterias Gram negativas no esporulados de forma alargada capaces de fermentar lactosa con producción de gas a $35 \pm 0,5$ °C (coliformes totales). Aquellas que tienen las mismas propiedades a $44,5 \pm 0,2$ °C en 24 horas se denominan coliformes fecales (ahora también denominados coliformes termotolerantes).

Demanda química de oxígeno (DQO): Medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidante sales inorgánicas de permanganato o dicromato de potasio.

Depuración de aguas residuales: Purificación o remoción de sustancias objetables de las aguas residuales; se aplica exclusivamente a procesos de tratamiento de líquidos.

Eficiencia del tratamiento: Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración aplicada, en un proceso o planta de tratamiento y para un parámetro específico. Puede expresarse en decimales o porcentaje.

Efluente: Líquido que sale de un proceso de tratamiento.

Emisor: Canal o tubería que recibe las aguas residuales de un sistema de alcantarillado hasta una planta de tratamiento o de una planta de tratamiento hasta un punto de disposición final.

Examen bacteriológico: Análisis para determinar y cuantificar el número de bacterias en las aguas residuales.

Filtro percolador: Sistema en el que se aplica el agua residual sedimentada sobre un medio filtrante de piedra gruesa o material sintético. La película de microorganismos que se desarrolla sobre el medio filtrante estabiliza la materia orgánica del agua residual.

Grado de tratamiento: Eficiencia de remoción de una PTAR para cumplir con los requisitos de calidad del cuerpo receptor o las normas de reúso.

Humedales artificiales: Son sistemas acuáticos diseñados para remover la mayor parte de los patógenos y nutrientes contenidos en el agua.

Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal: Está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de

tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado.

Medio filtrante: Material granular a través del cual pasa el agua residual con el propósito de purificación, tratamiento o acondicionamiento.

Muestreo: Toma de muestras de volumen predeterminado y con la técnica de preservación correspondiente para el parámetro que se va a analizar.

Nutriente: Cualquier sustancia que al ser asimilada por organismos, promueve su crecimiento. En aguas residuales se refiere normalmente al nitrógeno y fósforo, pero también pueden ser otros elementos esenciales.

Planta de tratamiento: Infraestructura y procesos que permiten la depuración de aguas residuales.

Pretratamiento: Procesos que acondicionan las aguas residuales para su tratamiento posterior.

Reúso de aguas residuales: Utilización de aguas residuales debidamente tratadas para un propósito específico.

Sedimentador: Es una tecnología que está diseñada para eliminar sólidos suspendidos por sedimentación

Sedimentación secundaria: Proceso de separación de la biomasa en suspensión producida en el tratamiento biológico.

Tratamiento primario: Remoción de una considerable cantidad de materia en suspensión sin incluir la materia coloidal y disuelta.

Tratamiento secundario: Nivel de tratamiento que permite lograr la remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos en suspensión.

Tratamiento terciario: Adicional al secundario. Ver tratamiento avanzado.

Tratamiento avanzado: Proceso de tratamiento fisicoquímico o biológico para alcanzar un grado de tratamiento superior al tratamiento secundario.

Anexos

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA		OBJETIVOS		HIPÓTESIS	VARIABLES		METODOLOGÍA	
Problema general		Objetivo general		Hipótesis general	1.- Variable independiente		Tipo de investigación:	
¿En qué medida, la granulometría del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?		Evaluar el efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal, PTAR "La Totorá", Ayacucho 2023.		La granulometría del sustrato influye significativamente en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.	Granulometría del sustrato		Cuantitativa	
Problemas específicos:		Objetivos Específicos:		Hipótesis específica:	Dimensiones:		Diseño de investigación:	
• ¿En qué medida el coeficiente de uniformidad del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?		1. Evaluar el efecto del coeficiente de uniformidad del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.		1. El coeficiente de uniformidad del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.	1.- Coeficiente de uniformidad (Cu)		Experimental	
					2.- Coeficiente de curvatura (Cc)			
					3.- Diámetro efectivo (De)		Población:	
					2.- Variable dependiente:		Agua residual proveniente del sedimentador N° 2 de la PTAR "La Totorá".	
• ¿En qué medida el coeficiente de curvatura del sustrato influye en la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?		2. Evaluar el efecto coeficiente de curvatura del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.		2. El coeficiente de curvatura del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.	Contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.		Muestra:	
					Dimensiones:		A partir del muestreo de los 03 humedales de flujo sub superficial horizontal, se conformarán muestras compuestas.	
					1. Temperatura °C 2. pH 3. Conductividad eléctrica 4. Sólidos disueltos SSD 5. Demanda biológica de oxígeno (DBO5); mg/L. 6. Coliformes fecales; NMP/100ml 7. Fosfatos (mg/L) 8. Nitratos (mg/L)		Unidad de análisis	
• ¿En qué medida el diámetro efectivo del sustrato influye en la eficiencia de remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal?		3. Evaluar el efecto de diámetro efectivo del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.		3. El diámetro efectivo del sustrato influye en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal.			Construcción de 03 humedales de flujo sub superficial horizontal a escala laboratorio: Humedales con sustrato de Ø1/4", Ø1/2" y Ø3/4".	
							Análisis de datos	
							Estadística descriptiva: tablas y figuras. Estadística descriptiva: análisis de regresión lineal	

Anexo 2. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

El Peruano
Lima, miércoles 17 de marzo de 2010



NORMAS LEGALES

415675

de impuestos o de derechos aduaneros de ninguna clase o denominación.

Artículo 5°.- La presente Resolución Suprema será refrendada por el Presidente del Consejo de Ministros.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

JAVIER VELASQUEZ QUESQUÉN
Presidente del Consejo de Ministros

469446-6

AMBIENTE

Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales

**DECRETO SUPREMO
N° 003-2010-MINAM**

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 3° de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, dispone que el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, las políticas, normas, instrumentos, incentivos y sanciones que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en dicha ley;

Que, el numeral 32.1 del artículo 32° de la Ley General del Ambiente define al Límite Máximo Permissible - LMP, como la medida de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio;

Que, el numeral 33.4 del artículo 33° de la Ley N° 28611 en mención dispone que, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplique el principio de la gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, el literal d) del artículo 7° del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente - MINAM, establece como función específica de dicho Ministerio, elaborar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), de acuerdo con los planes respectivos. Deben contar con la opinión del sector correspondiente, debiendo ser aprobados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 121-2009-MINAM, se aprobó el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el año fiscal 2009 que contiene dentro de su anexo la elaboración del Límite Máximo Permissible para los efluentes de Plantas de Tratamiento de fuentes domésticas;

Que el artículo 14° del Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) aprobado mediante Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, establece que el proceso de evaluación de impacto ambiental comprende medidas que aseguren, entre otros, el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental, los Límites Máximos Permisibles y otros parámetros y requerimientos aprobados de acuerdo a la legislación ambiental vigente; del mismo modo, en su artículo 28° el citado reglamento señala que, la modificación del estudio ambiental o la aprobación de instrumentos de gestión ambiental complementarios,

implica necesariamente y según corresponda, la actualización de los planes originalmente aprobados al emitirse la Certificación Ambiental;

De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8) del artículo 118° de la Constitución Política del Perú, y el numeral 3 del artículo 11° de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

DECRETA:

Artículo 1°.- Aprobación de Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR)

Aprobar los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, los que en Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo y que son aplicables en el ámbito nacional.

Artículo 2°.- Definiciones

Para la aplicación del presente Decreto Supremo se utilizarán los siguientes términos:

- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.

- **Límite Máximo Permissible (LMP):** Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

- **Protocolo de Monitoreo:** Procedimientos y metodologías establecidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en coordinación con el MINAM y que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

Artículo 3°.- Cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles de Efluentes de PTAR

3.1 Los LMP de efluentes de PTAR que se establecen en la presente norma entran en vigencia y son de cumplimiento obligatorio a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

3.2 Los LMP aprobados mediante el presente Decreto Supremo, no serán de aplicación a las PTAR con tratamiento preliminar avanzado o tratamiento primario que cuenten con disposición final mediante emisario submarino.

3.3. Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que no cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de dos (02) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento su Programa de Adecuación y Manejo Ambiental; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

3.4 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de tres (03) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la actualización de los Planes de Manejo Ambiental de los Estudios Ambientales; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

Artículo 4°.- Programa de Monitoreo

4.1 Los titulares de las PTAR están obligados a realizar el monitoreo de sus efluentes, de conformidad con el Programa de Monitoreo aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. El Programa de Monitoreo especificará la ubicación de los puntos de control, métodos y técnicas adecuadas; así como los parámetros y frecuencia de muestreo para cada uno de ellos.

4.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento podrá disponer el monitoreo de otros parámetros que no estén regulados en el presente Decreto Supremo, cuando existan indicios razonables de riesgo a la salud humana o al ambiente.

4.3 Sólo será considerado válido el monitoreo conforme al Protocolo de Monitoreo establecido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, realizado por Laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa del Consumidor y de la Propiedad Intelectual - INDECOPI.

Artículo 5°.- Resultados de monitoreo

5.1 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la administración de la base de datos del monitoreo de los efluentes de las PTAR, por lo que los titulares de las actividades están obligados a reportar periódicamente los resultados del monitoreo de los parámetros regulados en el Anexo de la presente norma, de conformidad con los procedimientos establecidos en el Protocolo de Monitoreo aprobado por dicho Sector.

5.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento deberá elaborar y remitir al Ministerio del Ambiente dentro de los primeros noventa (90) días de cada año, un informe estadístico a partir de los datos de monitoreo presentados por los Titulares de las PTAR, durante el año anterior, lo cual será de acceso público a través del portal institucional de ambas entidades.

Artículo 6°.- Fiscalización y Sanción

La fiscalización del cumplimiento de los LMP y otras disposiciones aprobadas en el presente Decreto Supremo estará a cargo de la autoridad competente de fiscalización, según corresponda.

Artículo 7°.- Refrendo

El presente Decreto Supremo será refrendado por el Ministro del Ambiente y por el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA FINAL

Única.- El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en coordinación con el MINAM, aprobará el Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR en un plazo no mayor a doce (12) meses contados a partir de la vigencia del presente dispositivo.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los dieciséis días del mes de marzo del año dos mil diez.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG
Ministro del Ambiente

JUAN SARMIENTO SOTO
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

ANEXO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica Oxígeno	de mg/L	100
Demanda Química Oxígeno	de mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales Suspensión	en mL/L	150
Temperatura	°C	<35

469446-2

Designan responsable de brindar información pública y del contenido del portal de internet institucional del Ministerio

RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 036-2010-MINAM

Lima, 16 de marzo de 2010

CONSIDERANDO:

Que, mediante Decreto Legislativo N° 1013, se aprobó la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

Que, la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, cuyo Texto Único Ordenado fue aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM, tiene por finalidad promover la transparencia de los actos del Estado y regular el derecho fundamental del acceso a la información consagrado en el numeral 5 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú;

Que, el artículo 3° de la citada Ley, señala que el Estado tiene la obligación de entregar la información que demanden las personas en aplicación del principio de publicidad, para cuyo efecto se designa al funcionario responsable de entregar la información solicitada;

Que, asimismo, de acuerdo a lo previsto en el artículo 5° de la mencionada Ley, las Entidades Públicas deben identificar al funcionario responsable de la elaboración de los Portales de Internet;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 070-2008-MINAM, se designó a la señorita Cristina Miranda Beas, como funcionaria responsable de brindar información que demanden las personas, y responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet del Ministerio del Ambiente;

Que, por razones del servicio y considerando la renuncia al cargo que desempeñaba en el Ministerio del Ambiente la servidora citada en el considerando precedente, resulta necesario designar al personal responsable de brindar información en el marco de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública y responsable del Portal de Internet Institucional;

Con el visado de la Secretaría General y de la Oficina de Asesoría Jurídica; y

De conformidad con lo establecido en el Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente; el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM; y el Decreto Supremo N° 007-2008-MINAM que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Designar al abogado Hugo Milko Ortega Polar como Responsable de brindar la información pública del Ministerio del Ambiente y Responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet Institucional, de conformidad con el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM.

Artículo 2°.- Todos los órganos del Ministerio del Ambiente, bajo responsabilidad, deberán facilitar la información y/o documentación que les sea solicitada como consecuencia de lo dispuesto en el artículo precedente, dentro de los plazos establecidos en la normatividad vigente.

Artículo 3°.- Disponer que la presente Resolución se publique en el Diario Oficial El Peruano y en Portal de Internet del Ministerio del Ambiente.

Artículo 4°.- Notificar la presente Resolución a todos los órganos del Ministerio del Ambiente, al Órgano de Control Institucional y al responsable designado.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG
Ministro del Ambiente

469445-1

Anexo 3. Ensayos de laboratorio, análisis granulométrico.

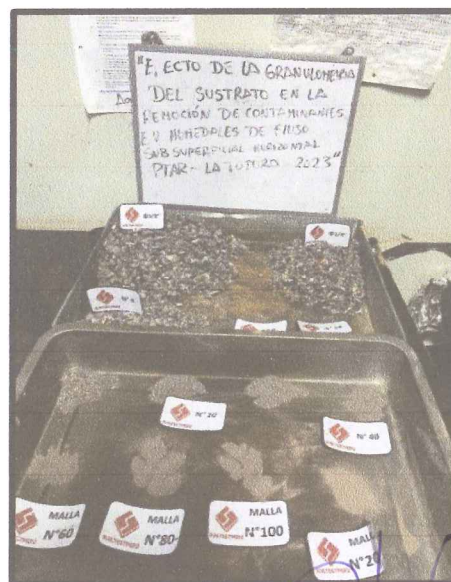


ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y
CONCRETO

ENSAYOS EN EN PIEDRA CHANCADA

DEL PROYECTO:

"EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO
EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN
HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL
HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023"



SOLICITANTE:

CARLOS F. SOTO PRETEL



Luis A. Zevallos Lactahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
Reg. CIP. 222451

Región : AYACUCHO
Provincia : HUAMANGA
Distrito : TAMBILLO
Lugar : CENTRO POBLADO DE
MUYURINA



FREBRERO 2023



INFORME ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO (NTP 400.012)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL

Cantera : PIEDRA DE 3/4 in.

Material : PIEDRA CHANCADA

Fecha : FEBRERO DEL 2023

Region : AYACUCHO

Provincia : HUAMANGA

Distrito : TAMBILLO

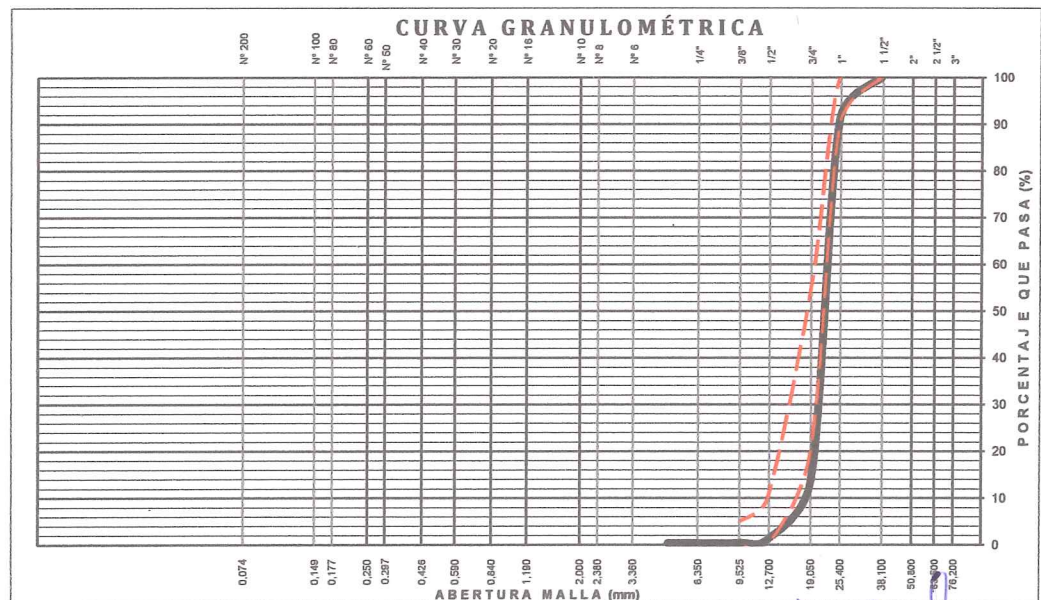
Lugar : CENTRO POBLADO DE MUYURINA

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO						
TAMIZ ASTM	Abertura (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMULADO	% QUE PASA	DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
3"	75.000	-	-	-	-	PESOS (gr) Peso humedo inicial 5951.00 Peso seco inicial 5951.00 Peso seco lavado 5951.00 Pérdida por lavado 0.0
2 1/2"	63.000	-	-	-	100.00	
2"	50.000	-	-	-	100.00	
1 1/2"	37.500	-	-	-	100.00	
1"	25.000	541.0	9.09	9.09	90.91	
3/4"	19.000	4,604.0	77.37	86.46	13.54	RESULTADOS ANALÍTICOS D ₁₀ = D _{e(mm)} = 17.13 D _{30(mm)} = 20.28 D _{60(mm)} = 22.60 Cu = 1.32 Cc = 1.06 D _{15(mm)} = 19.11 D _{50(mm)} = 21.83 D _{85(mm)} = 24.54 Tamaño Maximo 1 1/2" Tamaño Maximo Nominal 1" Gravedad especifica 2.63 Módulo de Fineza 7.84 Superficie especifica (cm ² /gr) 1.30
1/2"	12.500	735.0	12.35	98.81	1.19	
3/8"	9.500	46.0	0.77	99.58	0.42	
Nº 4	4.750	-	-	99.58	0.42	
Nº 8	2.360	-	-	99.58	0.42	
Nº16	1.180	-	-	99.58	0.42	
Nº 30	0.600	-	-	99.58	0.42	
Nº 50	0.300	6.0	0.10	99.68	0.32	
Nº 100	0.150	9.0	0.15	99.83	0.17	
Fondo		9.0	0.15	99.98	0.02	
Lavado		1.0	0.02	0.02	99.98	
TOTAL		5951.0	100.0			
RESULTADOS ESTANDARES			% Grava	99.58		
			% Arena	0.42		
			% de Finos	0.00		

CURVA GRANULOMETRICA Y HUSO GRANULOMETRICO

HUSO 57(1-4)



Luis A. Zevallos Lactahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
Pc. CIP. 222451

	ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO	Version: 01
		Fecha de versión: 21-01-2023
		Página: 1 / 1
PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS		

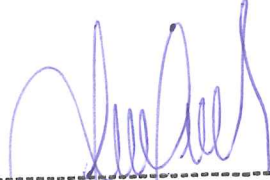
Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023"

Solicitante	: CARLOS F. SOTO PRETEL	Region	: AYACUCHO
Cantera	: PIEDRA DE 3/4 in.	Provincia	: HUAMANGA
Material	: PIEDRA CHANCADA	Distrito	: TAMBILLO
Fecha	: FEBRERO DEL 2023	Lugar	: CENTRO POBLADO DE MUYURINA

OBJETIVO: Obtencion de los Pesos Especificos aparente y nominal, asi como la absorcion despues de 24 horas de sumergidos en agua.

DEFINICIONES: En un solido permeable, si se incluye en su volumen la parte de vacios accesibles al agua en las condiciones que se establezcan, se define el volumen denominado aparente, si se excluye este volumen de vacios al volumen resultante, se le denomina nominal.

AGREGADO GRUESO (MTC E 206 - 2000, NTP 400.021)					
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO N° 01	ENSAYO N° 02	ENSAYO N° 03	PROMEDIO
A	Peso en el aire de la muestra seca (gr)	4,290	4,275.00	-	
B	Peso en el aire de la muestra SSS (gr)	4,332	4,315.31	-	
C	Peso sumergido en agua de la muestra SSS (gr)	2,653	2,649.00	-	
	Peso Especifico de masa = A/(B-C)	2.55	2.57	-	2.56
	Peso Especifico Aparente SSS = B/(B-C)	2.58	2.59	-	2.58
	Peso Especifico aparente = A/(A-C)	2.62	2.63	-	2.62
	% de Absorción = ((B - A)/A) x 100	0.99	0.94	-	0.96



 Luis A. Zevallos Llactahuaman
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
 Reg. CIP. 222451



INFORME

MATERIALES MAS FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ NORMALIZADO 75 μ m (N°200) POR LAVADO EN AGREGADOS (NTP 400.018)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 3/4 in. Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023 Lugar : CENTRO POBLADO DE MUYURINA

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

AGREGADO GRUESO		
PESO UNITARIO SUELTO SECO (PUSS)		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	7,625.0	7,630.0
Peso Agregado Suelto (gr)	3,978.0	3,983.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,405	1,407
PROMEDIO PUSS (Kg/m³)	1,406	
VACIOS (%)	43	
PESO UNITARIO COMPACTADO SECO (PUCS) METODO DEL APISONADO		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	8,019.0	8,007.0
Peso Agregado Suelto (gr)	4,372.0	4,360.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,545	1,540
PROMEDIO PUCS (Kg/m³)	1,543	
VACIOS (%)	38	



Luis A. Zavallos Llahtahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
N° 229451

INFORME
ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO
(NTP 400.012)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL

Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 1/2 in.

Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA

Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023

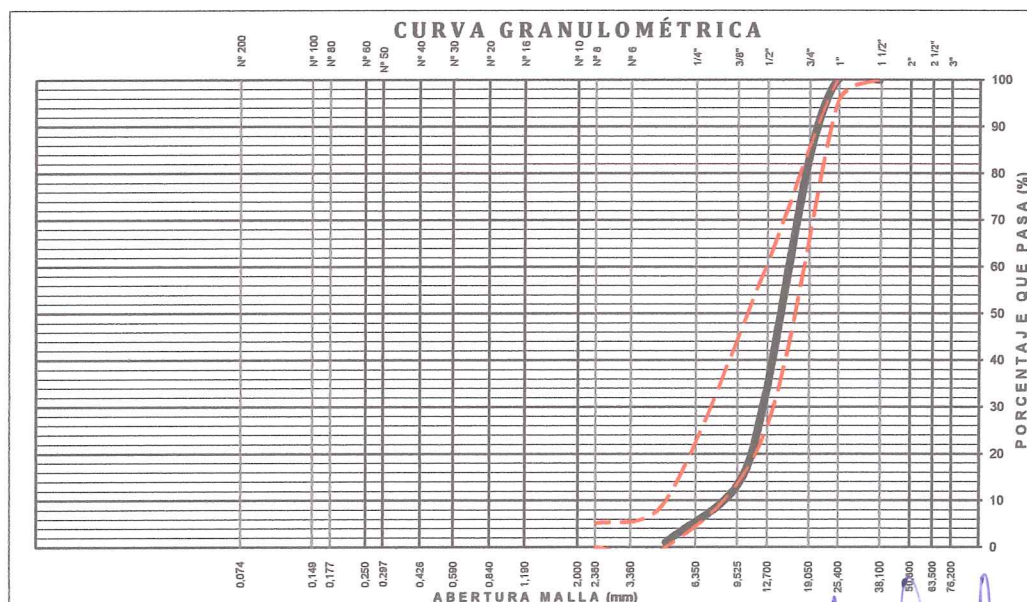
Lugar : CENTRO POBLADO MUYURINA

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

						DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
TAMIZ ASTM	Abertura (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMULADO	% QUE PASA			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	3"	75.000	-	-	-	PESOS (gr)		
	2 1/2"	63.000	-	-	100.00	Peso húmedo inicial	7155.00	
	2"	50.000	-	-	100.00	Peso seco inicial	7155.00	
	1 1/2"	37.500	-	-	100.00	Peso seco lavado	7155.00	
	1"	25.000	-	-	100.00	Pérdida por lavado	0.0	
	3/4"	19.000	1,185.0	16.56	16.56	83.44	RESULTADOS ANALÍTICOS	
	1/2"	12.500	3,617.0	50.55	67.11	32.89		
	3/8"	9.500	1,404.0	19.62	86.74	13.26		
	Nº 4	4.750	875.0	12.23	98.97	1.03		
	Nº 8	2.360	-	-	98.97	1.03		
	Nº 16	1.180	-	-	98.97	1.03		
	Nº 30	0.600	-	-	98.97	1.03		
	Nº 50	0.300	-	-	98.97	1.03		
	Nº 100	0.150	55.0	0.77	99.73	0.27		
	Fondo		18.0	0.25	99.99	0.01		
	Lavado		1.0	0.01	0.01	99.99		
	TOTAL		7155.0	100.0				
							Tamaño Máximo	1"
							Tamaño Máximo Nominal	3/4"
							Gravedad específica	2.63
						Módulo de Fineza	6.98	
						Superficie específica (cm²/gr)	2.53	

CURVA GRANULOMETRICA Y HUSO GRANULOMETRICO

HUSO 57(1-4)



Luis A. Zevallos Llacahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
BOL. CIP 222451



ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO

Version: 01

Fecha de versión:
21-01-2023

Página: 1 / 1

PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS

Proyecto : EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB
SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL

Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 1/2 in.

Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA

Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023

Lugar : CENTRO POBLADO DE
MUYURINA

OBJETIVO: Obtencion de los Pesos Especificos aparente y nominal, así como la absorcion despues de 24 horas de sumergidos en agua.

DEFINICIONES: En un solido permeable, si se incluye en su volumen la parte de vacios accesibles al agua en las condiciones que se establezcan, se define el volumen denominado aparente, si se excluye este volumen de vacios al volumen resultante, se le denomina nominal.

AGREGADO GRUESO (MTC E 206 - 2000, NTP 400.021)

IDENTIFICACIÓN		ENSAYO N° 01	ENSAYO N° 02	ENSAYO N° 03	PROMEDIO
A	Peso en el aire de la muestra seca (gr)	4,250	4,258.00	-	
B	Peso en el aire de la muestra SSS (gr)	4,328	4,332.00	-	
C	Peso sumergido en agua de la muestra SSS (gr)	2,590	2,594.00	-	
Peso Especifico de masa = A/(B-C)		2.45	2.45	-	2.45
Peso Especifico Aparente SSS = B/(B-C)		2.49	2.49	-	2.49
Peso Especifico aparente = A/(A-C)		2.56	2.56	-	2.56
% de Absorción = ((B - A)/A) x 100		1.84	1.74	-	1.79



Luis A. Zavallos Llaetahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
REG. CIP. 299451



INFORME

MATERIALES MAS FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ NORMALIZADO 75 μ m (N°200) POR LAVADO EN AGREGADOS (NTP 400.018)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL Region : AYACUCHO

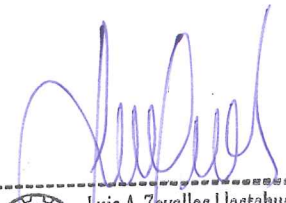
Cantera : PIEDRA DE 1/2 in. Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023 Lugar : CENTRO POBLADO DE MUYURINA

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

AGREGADO GRUESO		
PESO UNITARIO SUELTO SECO (PUSS)		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	7,704.0	7,710.0
Peso Agregado Suelto (gr)	4,057.0	4,063.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,433	1,436
PROMEDIO PUSS (Kg/m³)	1,434	
VACIOS (%)	42	
PESO UNITARIO COMPACTADO SECO (PUCS) METODO DEL APISONADO		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	7,992.0	7,984.0
Peso Agregado Suelto (gr)	4,345.0	4,337.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,535	1,532
PROMEDIO PUCS (Kg/m³)	1,534	
VACIOS (%)	38	


Luis A. Zevallos Llactahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
Rég. CIP. 222451





ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO

ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO (MTC E 204 - 2000)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL

Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 1/4 in.

Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA

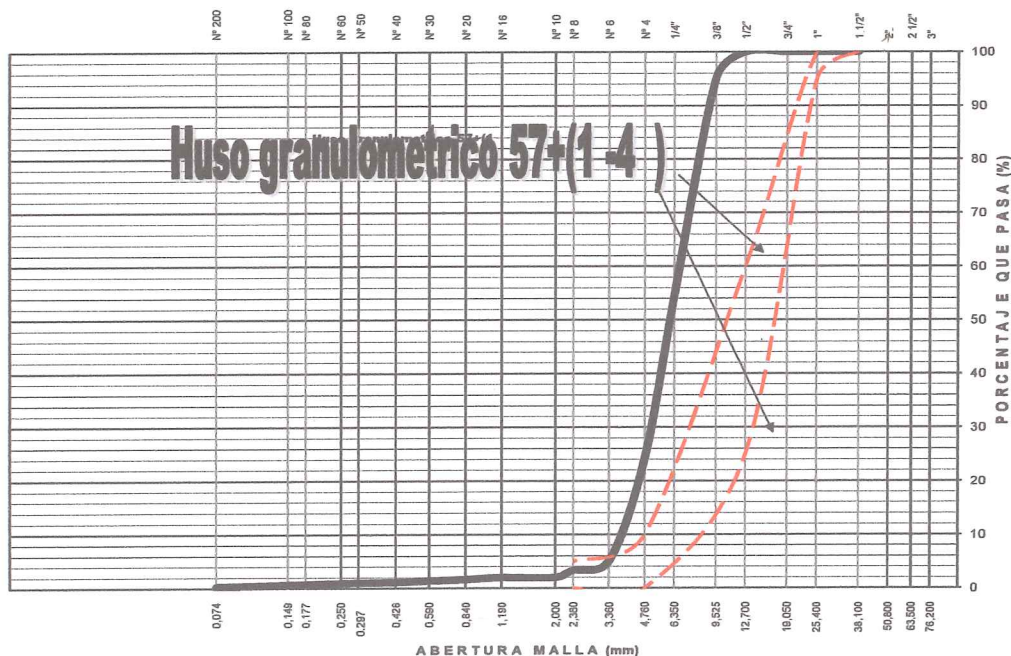
Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023

Lugar : CENTRO POBLADO DE MUJURINA

TAMIZ ASTM	Abertura (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO 56+ TMN 56+ (1-3/8")	DATOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO							
3"	76.200						PESOS (gr) Peso seco inicial 4070.00 Peso seco lavado 4069.00 Pérdida por lavado 1.0
2 1/2"	63.500		-	-	100.00		
2"	50.800		-	-	100.00		
1 1/2"	38.100		-	-	100.00	100 - 100	
1"	25.400		-	-	100.00	90 - 100	ENSAYOS ESTÁNDAR % Grava 75.70 % Arena 23.98 % de Finos 0.32 D ₁₀ = D ₆₀ (mm) = 3.72 D ₃₀ (mm) = 5.06 D ₆₀ (mm) = 6.76 Cu = 1.82 Cc = 1.02 D ₁₅ (mm) = 4.08 D ₅₀ (mm) = 6.10 D ₈₅ (mm) = 8.72 Clasificación SUCS GP
3/4"	19.050		-	-	100.00	40 - 85	
1/2"	12.700		-	-	100.00	10 - 40	
3/8"	9.525	193.00	4.74	4.74	95.26	0 - 15	
1/4"	6.350	1,648.00	40.49	45.23	54.77		GRAVA MAL GRADUADA Tamaño Maximo 1/2" Tamaño Maximo Nominal 3/8" Gravedad especifica 2.59 Módulo de Fineza 5.72 Superficie especifica (cm ² /gr) 6.67
Nº 4	4.760	1,240.00	30.47	75.70	24.30	0 - 5	
Nº 6	3.360	784.00	19.26	94.96	5.04		
Nº 8	2.380	69.00	1.70	96.66	3.34		
Nº 10	2.000	54.00	1.33	97.99	2.01		
Nº 16	1.190	-	-	97.99	2.01		
Nº 20	0.840	15.00	0.37	98.35	1.65		
Nº 30	0.590	10.00	0.25	98.60	1.40		
Nº 40	0.426	8.00	0.20	98.80	1.20		
Nº 50	0.297	7.00	0.17	98.97	1.03		
Nº 60	0.250	3.00	0.07	99.04	0.96		
Nº 80	0.177	7.00	0.17	99.21	0.79		
Nº 100	0.149	4.00	0.10	99.31	0.69		
Nº 200	0.074	15.00	0.37	99.68	0.32		
Fondo		12.0	0.29	99.98	0.02		
Lavado		0.0	-	99.98	0.02		
TOTAL		4069.0	100.0				

CURVA GRANULOMÉTRICA



LIMO Y ARCILLA	ARENA			GRAVA		BOLEOS/ BLOQUE
	FINA	MEDIA	GRUESA	FINA	GRUESA	



Luis A. Zavallos Uactahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
RUC 27299454

	ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO	Version: 01
		Fecha de versión: 21-01-2023
		Página: 1 / 1
PESO ESPECIFICO Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS		

Proyecto : EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" AYACUCHO 2023

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL

Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 1/4 in.

Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA

Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023

Lugar : CENTRO POBLADO DE MUYURINA

OBJETIVO: Obtención de los Pesos Específicos aparente y nominal, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua.

DEFINICIONES: En un sólido permeable, si se incluye en su volumen la parte de vacíos accesibles al agua en las condiciones que se establezcan, se define el volumen denominado aparente, si se excluye este volumen de vacíos al volumen resultante, se le denomina nominal.

AGREGADO GRUESO (MTC E 206 - 2000, NTP 400.021)					
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO N° 01	ENSAYO N° 02	ENSAYO N° 03	PROMEDIO
A	Peso en el aire de la muestra seca (gr)	4,093	4,101.00	-	
B	Peso en el aire de la muestra SSS (gr)	4,102	4,103.00	-	
C	Peso sumergido en agua de la muestra SSS (gr)	2,518	2,507.00	-	
	Peso Específico de masa = A/(B-C)	2.58	2.57	-	2.58
	Peso Específico Aparente SSS = B/(B-C)	2.59	2.57	-	2.58
	Peso Específico aparente = A/(A-C)	2.60	2.57	-	2.59
	% de Absorción = ((B - A)/A) x 100	0.22	0.05	-	0.13



 Luis A. Zevallos Llactahuaman
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
 R.O.C. 222461



INFORME

MATERIALES MAS FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ NORMALIZADO 75 μ m (N°200) POR LAVADO EN AGREGADOS (NTP 400.018)

Proyecto : "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023"

Solicitante : CARLOS F. SOTO PRETEL Region : AYACUCHO

Cantera : PIEDRA DE 1/4 in. Provincia : HUAMANGA

Material : PIEDRA CHANCADA Distrito : TAMBILLO

Fecha : FEBRERO DEL 2023 Lugar : CENTRO POBLADO DE MUYURINA

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

AGREGADO GRUESO		
PESO UNITARIO SUELTO SECO (PUSS)		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	7,400.0	7,374.0
Peso Agregado Suelto (gr)	3,753.0	3,727.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,326	1,317
PROMEDIO PUSS (Kg/m³)	1,321	
VACIOS (%)	47	
PESO UNITARIO COMPACTADO SECO (PUCS) METODO DEL APISONADO		
DESCRIPCIÓN	Ensayo N° 01	Ensayo N° 02
Peso Molde (gr)	3,647.0	3,647.0
Peso Agregado + Molde (gr)	7,664.0	7,655.0
Peso Agregado Suelto (gr)	4,017.0	4,008.0
Volumen del Molde (cm³)	2,830.3	2,830.3
Peso Unitario Suelto Seco (Kg/m³)	1,419	1,416
PROMEDIO PUCS (Kg/m³)	1,418	
VACIOS (%)	43	



Luis A. Zevallos Llahtahuaman
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA Y CONCRETO
P.O. CIP. 222451

Anexo 4. Informe de Ensayo del Análisis Fisicoquímico y Bacteriológico.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

Departamento Académico de
Ciencias Biológicas



Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de
Información Geográfica (SIG).

INFORME DE ENSAYO N° 008 - 2023

Proyecto: "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023".

Localidad: LA TOTORA - JESÚS NAZARENO - HUAMANGA - AYACUCHO.

Solicitante: CARLOS F. SOTO PRETEL

Dirección Legal: Asoc Basilio Auqui Mz J, Lte 09 - Ayacucho

CUADRO N° 01: IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

DATOS DE LA MUESTRA:	Muestreador: Carlos Soto Pretel
TIPO DE MUESTRA:	Aguas residuales-PTAR La Totorá
NOMBRE DEL LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA DE AGUA:	PTAR la Totorá: Sedimentador integrado N° 02 (afluente) y humedales artificiales (efluente) de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4"
VOLUMEN DE MUESTRA	Muestras de 500 mL c/u.
FECHA DE MUESTREO:	20/04/2023
UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM)	X: 585,802.05 m E
	Y: 8'547,058.17 m N
	Altitud: 2,627 m. s. n. m.
MÉTODO DE MUESTREO:	NTP 214.005 - 1987 (Rev. 2011) Ítem 4.4 y 4.5.
PRESENTACIÓN:	En frascos de plástico cerrado, preservados y refrigerados en Cooler.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Aguas residuales que salen del Sedimentador integrado N° 02 y humedales artificiales de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" debidamente rotulados o etiquetados.
FECHA DE INGRESO DE LA MUESTRA:	20/04/2023
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS:	20/04/2023
FECHA DE TÉRMINO DEL ANÁLISIS:	25/04/2023

Desarrollado por: Laboratorio de Control Ambiental, Biodiversidad y SIG - FCB - UNSCH.


Bgo. Carlos E. Carrasco Badajoz
CBP. 6893



CUADRO N° 02: ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR "La Totorá" – ABRIL 2023

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal			(LMP) DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"	
Temperatura	°C	15.8	15.1	15.2	15.4	-.-
pH	Unidad	7.75	7.04	7.07	7.15	6.5 – 8.5
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1600	1170	1340	1405	-.-
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	710	433	465	510	-.-
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	190	34	38	40	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	22000000	2300000	3300000	4900000	10,000
Fosfatos	mg/L	26.48	11.88	14.12	17.86	-.-
Nitratos	mg/L	2.963	1.938	2.137	2.321	-.-

LMP = Límite Máximo Permisible
 NMP = Número Más Probable.
 mg/L = Miligramos por litro
 µs/cm = Microsiems por centímetro
 NTU = unidades Nefelométricas de Turbidez
 ECA = Estándares de Calidad Ambiental.
 A2 = Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 °C = grados centígrados
 ml = mililitro

Observación 01: Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Observación 02: La muestra fue proporcionada por el solicitante.

Observación 03: Los valores expresados en el presente ensayo representan solo a la muestra analizada.

Observación 04: Según la ley de aguas 17752, el agua de consumo humano no debe presentar ningún Coliforme termotolerante.

Ayacucho, Abril 28 del 2023.


 Elgo. Carlos E. Carrasco Badoza
 C.B.F. 8893



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

Departamento Académico de
Ciencias Biológicas



Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de
Información Geográfica (SIG).

INFORME DE ENSAYO N° 009 - 2023

Proyecto: "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023".

Localidad: LA TOTORA - JESÚS NAZARENO - HUAMANGA - AYACUCHO.

Solicitante: CARLOS F. SOTO PRETEL

Dirección Legal: Asoc Basilio Auqui Mz J, Lte 09 - Ayacucho

CUADRO N° 01: IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

DATOS DE LA MUESTRA:	Muestreador: Carlos Soto Pretel
TIPO DE MUESTRA:	Aguas residuales-PTAR La Totorá
NOMBRE DEL LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA DE AGUA:	PTAR la Totorá: Sedimentador integrado N° 02 (afluente) y humedales artificiales (efluente) de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4"
VOLUMEN DE MUESTRA	Muestras de 500 mL c/u.
FECHA DE MUESTREO:	20/04/2023
UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM)	X: 585,802.05 m E
	Y: 8'547,058.17 m N
	Altitud: 2,627 m. s. n. m.
MÉTODO DE MUESTREO:	NTP 214.005 - 1987 (Rev. 2011) Ítem 4.4 y 4.5.
PRESENTACIÓN:	En frascos de plástico cerrado, preservados y refrigerados en Cooler.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Aguas residuales que salen del Sedimentador integrado N° 02 y humedales artificiales de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" debidamente rotulados o etiquetados.
FECHA DE INGRESO DE LA MUESTRA:	20/05/2023
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS:	20/05/2023
FECHA DE TÉRMINO DEL ANÁLISIS:	25/05/2023

Desarrollado por: Laboratorio de Control Ambiental, Biodiversidad y SIG - FCB - UNSCH.



Blgo. Carlos E. Carrasco Badajoz
CBP. 6893



CUADRO N° 02: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR "La Totorá" – MAYO 2023

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal			(LMP) DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"	Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Temperatura	°C	20.2	19.5	19.7	19.8	-.-
pH	Unidad	7.75	7.18	7.22	7.44	6.5 – 8.5
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1320	934	973	1057	-.-
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	628	449	506	529	-.-
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	178	23	25	31	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	28000000	3700000	4200000	5000000	10,000
Fosfatos	mg/L	31.049	16.539	20.327	23.52	-.-
Nitratos	mg/L	3.791	2.365	2.613	2.88	-.-

LMP = Límite Máximo Permissible
 NMP = Número Más Probable.
 mg/L = Miligramos por litro
 µs/cm = Microsiems por centímetro
 NTU = unidades Nefelométricas de Turbidez
 ECA = Estándares de Calidad Ambiental.
 A2 = Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 °C = grados centígrados
 ml = mililitro

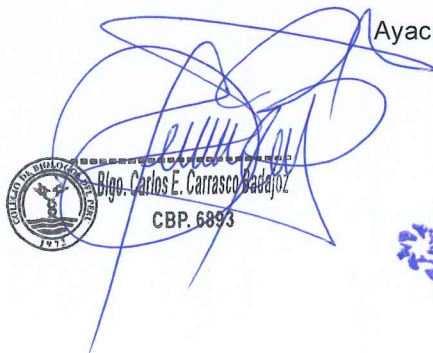
Observación 01: Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Observación 02: La muestra fue proporcionada por el solicitante.

Observación 03: Los valores expresados en el presente ensayo representan solo a la muestra analizada.

Observación 04: Según la ley de aguas 17752, el agua de consumo humano no debe presentar ningún Coliforme termotolerante.

Ayacucho, Mayo 31 del 2023.


 Blgo. Carlos E. Carrasco Padajoz
 CBP. 6893



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

Departamento Académico de
Ciencias Biológicas



Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de
Información Geográfica (SIG).

INFORME DE ENSAYO N° 010 - 2023

Proyecto: "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023".

Localidad: LA TOTORA - JESÚS NAZARENO - HUAMANGA - AYACUCHO.

Solicitante: CARLOS F. SOTO PRETEL

Dirección Legal: Asoc Basilio Auqui Mz J, Lte 09 - Ayacucho

CUADRO N° 01: IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

DATOS DE LA MUESTRA:	Muestreador: Carlos Soto Pretel
TIPO DE MUESTRA:	Aguas residuales-PTAR La Totorá
NOMBRE DEL LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA DE AGUA:	PTAR la Totorá: Sedimentador integrado N° 02 (afluente) y humedales artificiales (efluente) de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4"
VOLUMEN DE MUESTRA	Muestras de 500 mL c/u.
FECHA DE MUESTREO:	20/04/2023
UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM)	X: 585,802.05 m E
	Y: 8'547,058.17 m N
	Altitud: 2,627 m. s. n. m.
MÉTODO DE MUESTREO:	NTP 214.005 - 1987 (Rev. 2011) Ítem 4.4 y 4.5.
PRESENTACIÓN:	En frascos de plástico cerrado, preservados y refrigerados en Cooler.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Aguas residuales que salen del Sedimentador integrado N° 02 y humedales artificiales de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" debidamente rotulados o etiquetados.
FECHA DE INGRESO DE LA MUESTRA:	20/06/2023
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS:	20/06/2023
FECHA DE TÉRMINO DEL ANÁLISIS:	25/06/2023

Desarrollado por: Laboratorio de Control Ambiental, Biodiversidad y SIG - FCB - UNSCH.


Bigo. Carlos E. Carrasco Badajoz
CBP. 6893



CUADRO N° 02: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR "La Totorá" – JUNIO 2023

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal			(LMP) DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"	Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Temperatura	°C	22.4	21.8	22.1	22.2	-.-
pH	Unidad	7.82	7.35	7.4	7.62	6.5 – 8.5
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1240	830	860	909	-.-
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	590	420	465	495	-.-
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	206	21	23	30	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	17000000	2900000	4000000	4800000	10,000
Fosfatos	mg/L	32.663	18.56	20.69	21.58	-.-
Nitratos	mg/L	5.27	3.54	3.66	3.92	-.-

LMP = Límite Máximo Permisible
 NMP = Número Más Probable.
 mg/L = Miligramos por litro
 µS/cm = Microsiemens por centímetro
 NTU = unidades Nefelométricas de Turbidez
 ECA = Estándares de Calidad Ambiental.
 A2 = Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 °C = grados centígrados
 ml = mililitro

Observación 01: Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Observación 02: La muestra fue proporcionada por el solicitante.

Observación 03: Los valores expresados en el presente ensayo representan solo a la muestra analizada.

Observación 04: Según la ley de aguas 17752, el agua de consumo humano no debe presentar ningún Coliforme termotolerante.

Ayacucho, Junio 29 del 2023.


 Sr. Carlos E. Carrasco Badojuz
 CBP 6883



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

Departamento Académico de
Ciencias Biológicas



Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de
Información Geográfica (SIG).

INFORME DE ENSAYO N° 011 - 2023

Proyecto: "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023".

Localidad: LA TOTORA - JESÚS NAZARENO - HUAMANGA - AYACUCHO.

Solicitante: CARLOS F. SOTO PRETEL

Dirección Legal: Asoc Basilio Auqui Mz J, Lte 09 - Ayacucho

CUADRO N° 01: IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

DATOS DE LA MUESTRA:	Muestreador: Carlos Soto Pretel
TIPO DE MUESTRA:	Aguas residuales-PTAR La Totorá
NOMBRE DEL LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA DE AGUA:	PTAR la Totorá: Sedimentador integrado N° 02 (afluente) y humedales artificiales (efluente) de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4"
VOLUMEN DE MUESTRA	Muestras de 500 mL c/u.
FECHA DE MUESTREO:	20/04/2023
UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM)	X: 585,802.05 m E
	Y: 8'547,058.17 m N
	Altitud: 2,627 m. s. n. m.
MÉTODO DE MUESTREO:	NTP 214.005 - 1987 (Rev. 2011) Ítem 4.4 y 4.5.
PRESENTACIÓN:	En frascos de plástico cerrado, preservados y refrigerados en Cooler.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Aguas residuales que salen del Sedimentador integrado N° 02 y humedales artificiales de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" debidamente rotulados o etiquetados.
FECHA DE INGRESO DE LA MUESTRA:	20/07/2023
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS:	20/07/2023
FECHA DE TÉRMINO DEL ANÁLISIS:	25/07/2023

Desarrollado por: Laboratorio de Control Ambiental, Biodiversidad y SIG - FCB - UNSCH.



Bio. Carlos E. Carrasco Badajoz
CBP. 6893



CUADRO N° 02: ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR "La Totorá" – JULIO 2023

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal			(LMP) DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"	Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Temperatura	°C	20.7	18.8	19.4	19.9	-.-
pH	Unidad	7.43	7.22	7.29	7.33	6.5 – 8.5
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1280	826	902	968	-.-
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	668	479	496	525	-.-
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	197	27	31	35	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	18000000	2700000	3400000	3600000	10,000
Fosfatos	mg/L	29.58	18.21	19.53	22.08	-.-
Nitratos	mg/L	4.36	2.95	3.18	3.35	-.-

LMP = Límite Máximo Permissible
 NMP = Número Más Probable.
 mg/L = Miligramos por litro
 µs/cm = Microsiems por centímetro
 NTU = unidades Nefelométricas de Turbidez
 ECA = Estándares de Calidad Ambiental.
 A2 = Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 °C = grados centígrados
 ml = mililitro

Observación 01: Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Observación 02: La muestra fue proporcionada por el solicitante.

Observación 03: Los valores expresados en el presente ensayo representan solo a la muestra analizada.

Observación 04: Según la ley de aguas 17752, el agua de consumo humano no debe presentar ningún Coliforme termotolerante.

Ayacucho, Julio 31 del 2023.


 Bgo. Carlos E. Carrasco Bavaio
 CBP. 6893



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

Departamento Académico de
Ciencias Biológicas



Laboratorio de Biodiversidad y Sistema de
Información Geográfica (SIG).

INFORME DE ENSAYO N° 012 - 2023

Proyecto: "EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023".

Localidad: LA TOTORA - JESÚS NAZARENO - HUAMANGA - AYACUCHO.

Solicitante: CARLOS F. SOTO PRETEL

Dirección Legal: Asoc Basilio Auqui Mz J, Lte 09 - Ayacucho

CUADRO N° 01: IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

DATOS DE LA MUESTRA:	Muestreador: Carlos Soto Pretel
TIPO DE MUESTRA:	Aguas residuales-PTAR La Totorá
NOMBRE DEL LUGAR DE LA TOMA DE MUESTRA DE AGUA:	PTAR la Totorá: Sedimentador integrado N° 02 (afluente) y humedales artificiales (efluente) de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4"
VOLUMEN DE MUESTRA	Muestras de 500 mL c/u.
FECHA DE MUESTREO:	20/04/2023
UBICACIÓN GEOGRÁFICA (UTM)	X: 585,802.05 m E
	Y: 8'547,058.17 m N
	Altitud: 2,627 m. s. n. m.
MÉTODO DE MUESTREO:	NTP 214.005 - 1987 (Rev. 2011) Ítem 4.4 y 4.5.
PRESENTACIÓN:	En frascos de plástico cerrado, preservados y refrigerados en Cooler.
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:	Aguas residuales que salen del Sedimentador integrado N° 02 y humedales artificiales de 03 humedales, Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" debidamente rotulados o etiquetados.
FECHA DE INGRESO DE LA MUESTRA:	20/08/2023
FECHA DE INICIO DEL ANÁLISIS:	20/08/2023
FECHA DE TÉRMINO DEL ANÁLISIS:	25/08/2023

Desarrollado por: Laboratorio de Control Ambiental, Biodiversidad y SIG - FCB - UNSCH.



Bigo. Carlos E. Carrasco Badajoz
CBP 6893



CUADRO N° 02: ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES PTAR “La Totorá” – AGOSTO 2023

Parámetro	Unidad	Sedimentador	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal			(LMP) DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
		Afluente	Efluente Ø 1/4"	Efluente Ø 1/2"	Efluente Ø 3/4"	
Temperatura	°C	19.9	19.1	19.3	19.6	-.-
pH	Unidad	8.02	7.85	7.91	7.94	6.5 – 8.5
Conductividad eléctrica	mhos/cm ó µS/cm	1180	772	815	837	-.-
Sólidos totales disueltos (TDS)	mg/L	690	505	528	560	-.-
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	mg/L	182	23	26	28	100
Coliformes fecales	NMP/100 ml	25000000	3500000	4000000	4600000	10,000
Fosfatos	mg/L	26.5	16.71	17.92	18.33	-.-
Nitratos	mg/L	3.52	2.4	2.54	2.71	-.-

LMP = Límite Máximo Permisible
 NMP = Número Más Probable.
 mg/L = Miligramos por litro
 µS/cm = Microsiems por centímetro
 NTU = unidades Nefelométricas de Turbidez
 ECA = Estándares de Calidad Ambiental.
 A2 = Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 °C = grados centígrados
 ml = mililitro

Observación 01: Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Observación 02: La muestra fue proporcionada por el solicitante.

Observación 03: Los valores expresados en el presente ensayo representan solo a la muestra analizada.

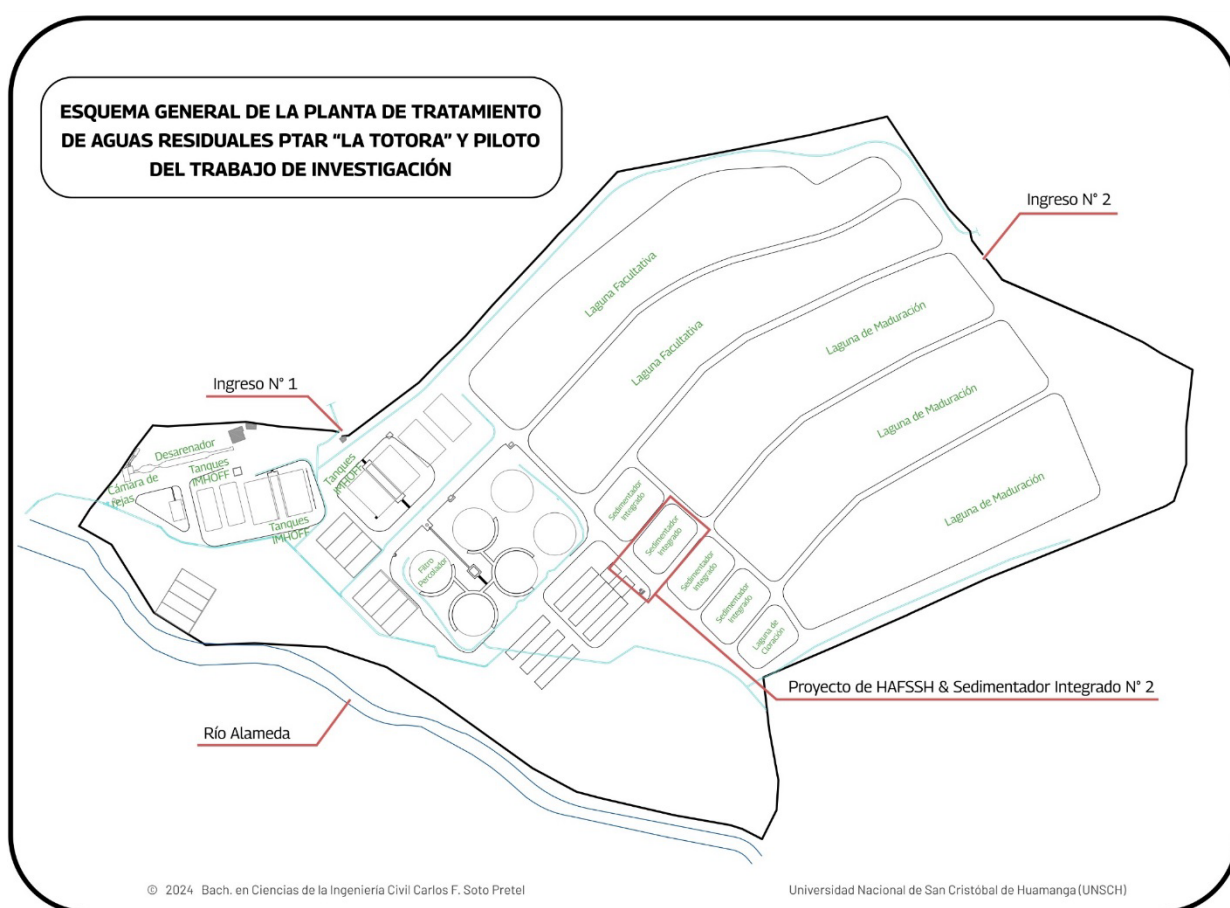
Observación 04: Según la ley de aguas 17752, el agua de consumo humano no debe presentar ningún Coliforme termotolerante.


 Bdo. Carlos E. Carrasco Badajoz
 CBP-6893

Ayacucho, Agosto 28 del 2023.



Anexo 5. Panel fotográfico



Fotografías N° 01. Ubicación y esquema general de la PTAR "la Totorá", localización del punto o lugar del proyecto de investigación.



Fotografías N° 02. Ensayos de laboratorio Análisis Granulométrico de agregado grueso en gravas de $\phi 1/4"$, $\phi 1/2"$, $\phi 3/4"$, utilizado como sustrato.



Fotografías N° 03. Superior indica el trazo, replanteo, excavaciones y proceso constructivo de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal - HAFSSH; Inferior, indica la colocación y distribución del sustrato con piedra de Ø 2" (extremos), gravas de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4" (parte media del humedal), en la poza de descarga o evacuación se ve la tubería PVC SAP de Ø 1/2" lugar de puntos de muestreo.



Fotografías N° 04. Superior indica instalaciones sanitarias del tanque cisterna y los humedales con tuberías PVC SAP Ø 2" y Ø 1/2", se muestran también las instalaciones de la electrobomba y las plantaciones de rizomas o plántulas de *Typha angustifolia* "totoras"; Inferior, indica el llenado de los tanques cisterna con aguas residuales provenientes del sedimentador integrado N° 2; además, el funcionamiento de los humedales una vez regulada y abierta las válvulas de ingreso que llevan aguas residuales a los humedales.



Fotografías N° 05. Indica la operación, monitoreo y manejo de los humedales y así evitar obstrucciones y entaponamientos en goteros; además, del llenado de los tanques cisterna.



Fotografías N° 06. En la parte superior, trabajos de regulación y estandarización del caudal útil antes de su aforo en los Efluentes de los humedales con gravas de $\varnothing$ 1/4", $\varnothing$ 1/2", $\varnothing$ 3/4"; Inferior se realizan los muestreos correspondientes del mes, tanto del Sedimentador Integrado N° 2 (Afluente), como de los HAFSSH (Efluentes). Luego las muestras, son transportados en un Cooler hacia los laboratorios para su análisis respectivo.



Fotografías N° 07. Trabajos de laboratorio para el análisis físico, químico bacteriológico. Los parámetros a evaluados con un Multiparámetro In Situ son la temperatura, pH, Conductividad eléctrica, y Sólidos totales disueltos (TDS); por otro lado, las muestras de 500 ml se llevan a los laboratorios de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Facultad de Ciencias Biológicas y el PTAR “la Totorá” para su análisis correspondiente (DBO5, Coliformes fecales, fosfatos y nitratos), para ello se hacen uso de los equipos: Incubadora y sistema de medición de DBO5, Espectrofotómetro y botellas y diluciones.

Anexo 6. PLANOS

**ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES PTAR "LA TOTORA" Y PILOTO
DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

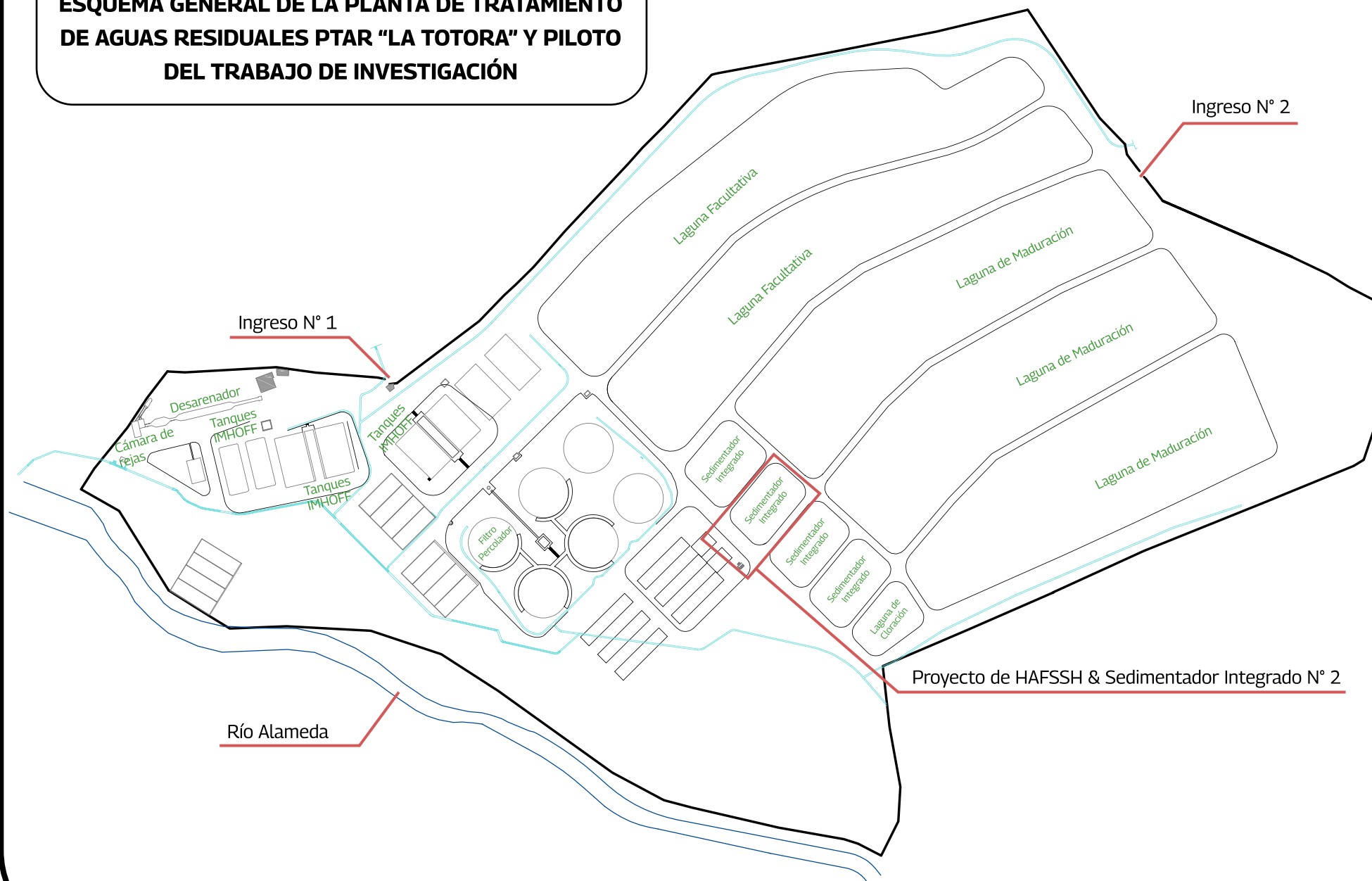
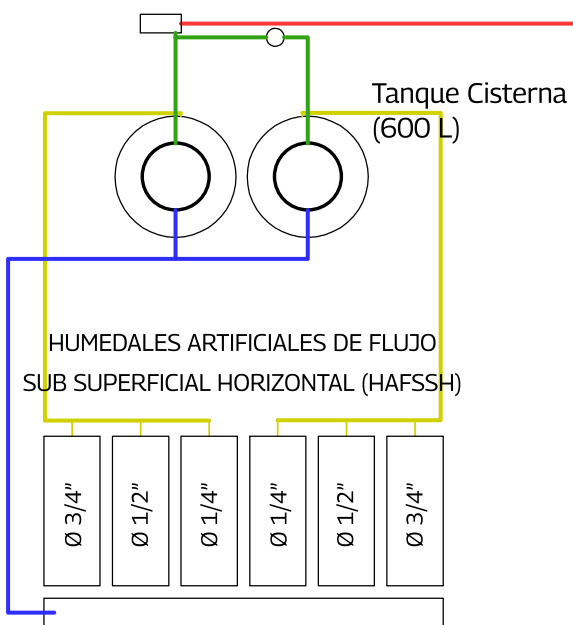


DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

SEDIMENTADOR INTEGRADO N° 2

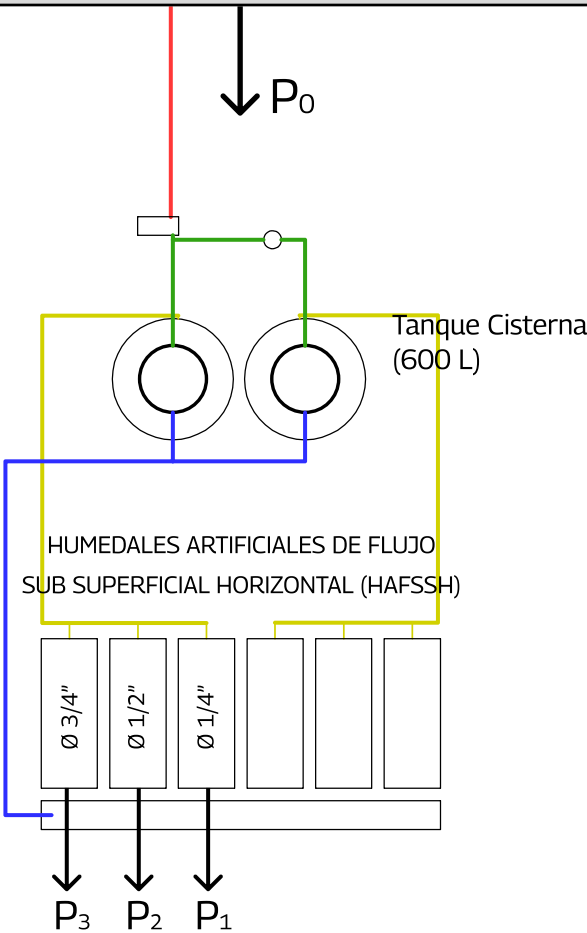


LEYENDA

- Tubería HDPE Ø 1" de transporte de agua residual desde el Sedimentador hasta la Electrobomba
- Tubería PVC SAP Ø 1" a 3/4" y 1/2" de conducción de agua residual de la Electrobomba (1/2HP) hacia los tanques cisterna
- Tubería PVC SAP Ø 2" de rebose desde los tanques cisterna
- Tubería PVC SAP Ø 1/2" de conducción de agua residual desde los tanques cisterna hacia los Humedales Artificiales (HAFSSH)

DIAGRAMA DE PUNTOS DE MUESTREO PARA TOMA DE DATOS

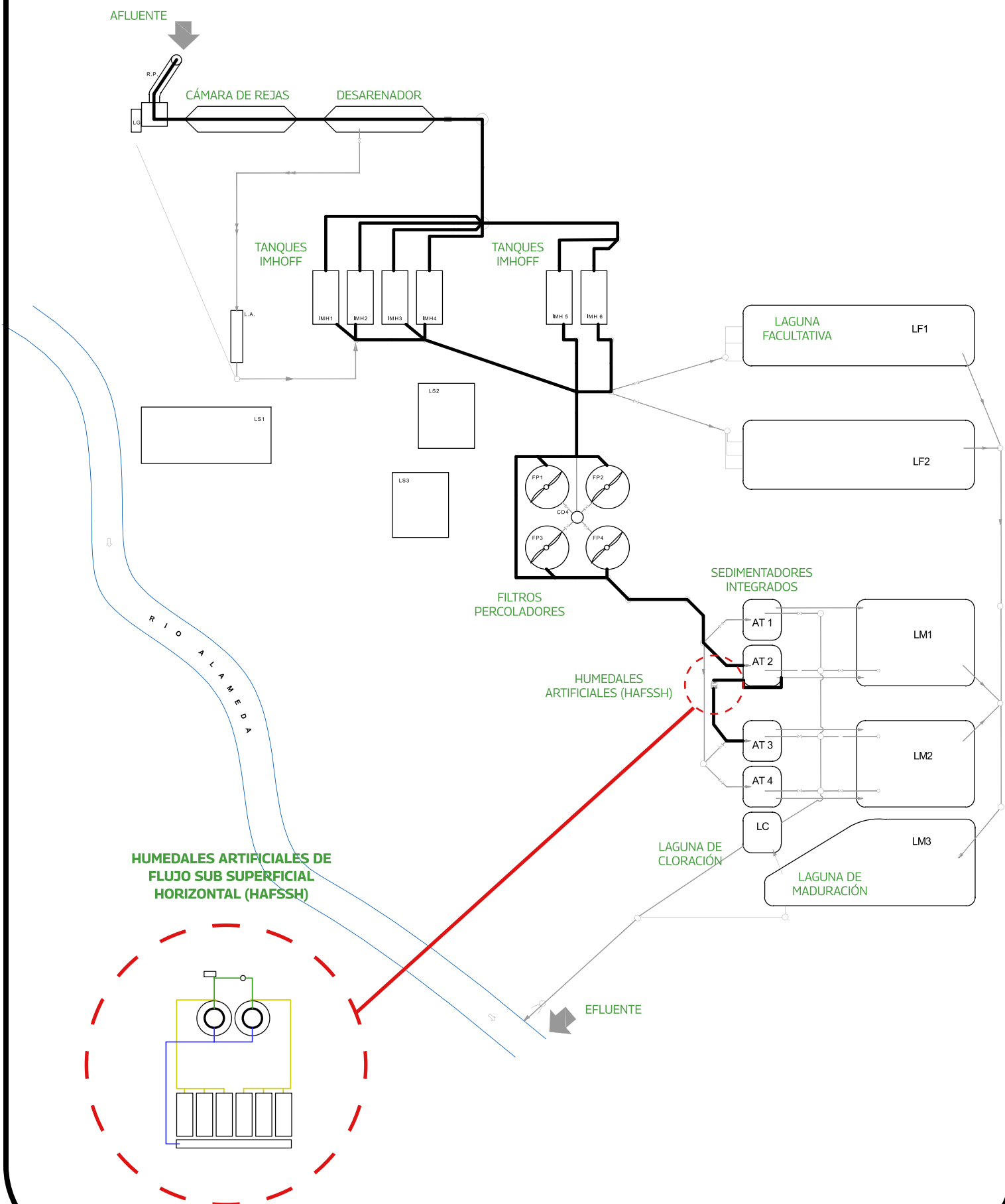
SEDIMENTADOR INTEGRADO N° 2

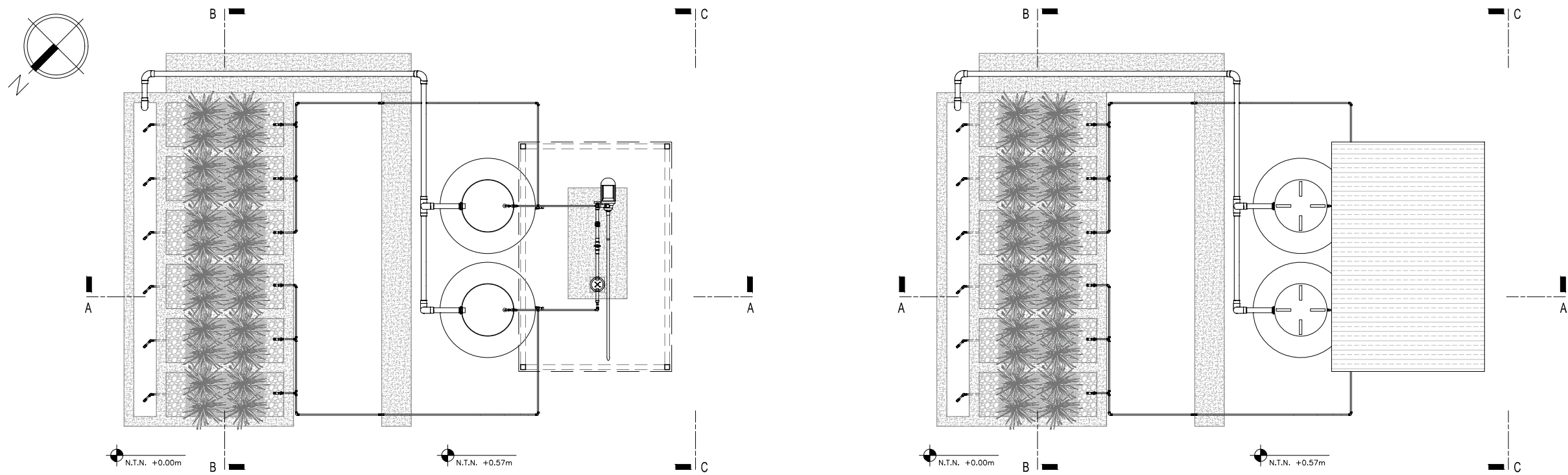


LEYENDA

P: Puntos de muestreo

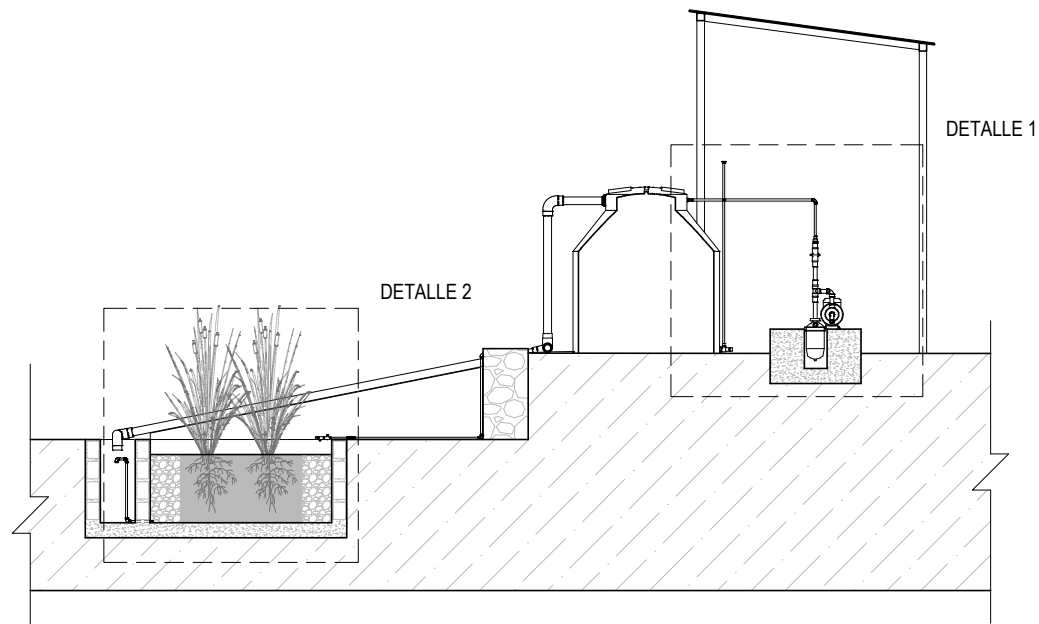
**ESQUEMA DEL FLUJO DE RECORRIDO DE AGUAS RESIDUALES
HACIA LOS REACTORES PILOTO (HUMEDALES ARTIFICIALES)**



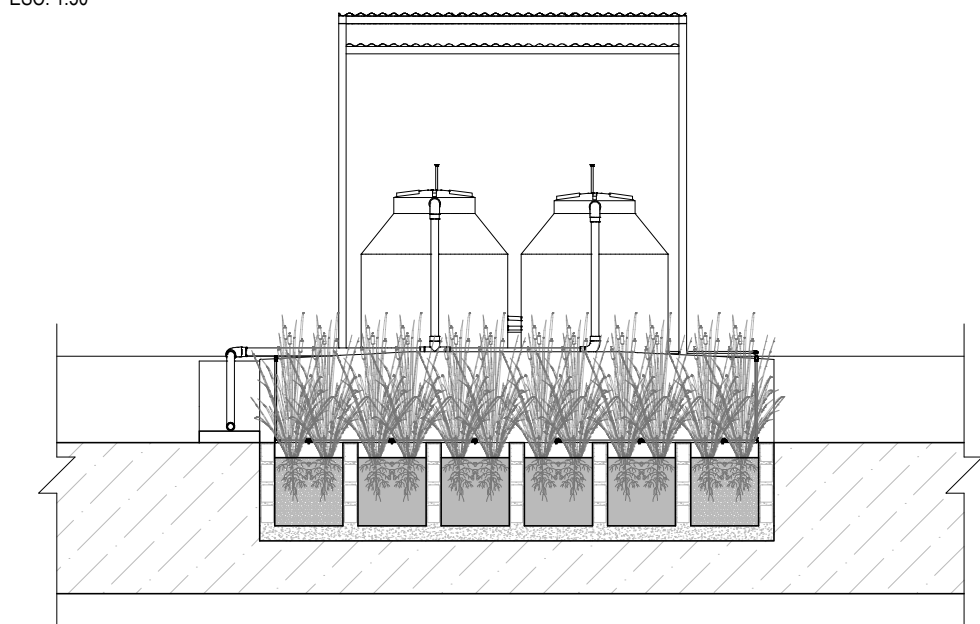


PLANO GENERAL
ESC. 1:50

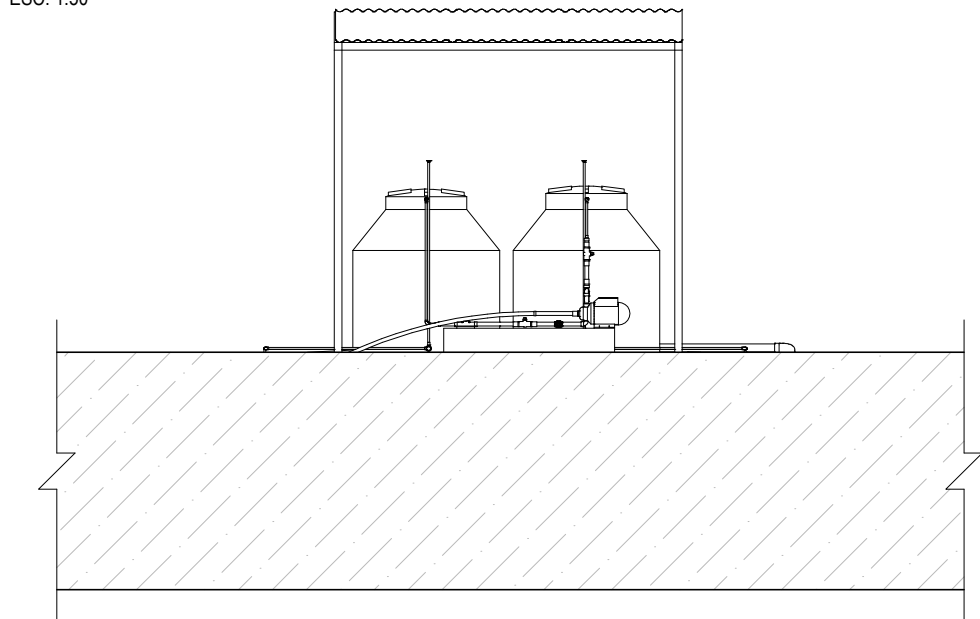
PLANO CON CUBIERTA
ESC. 1:50



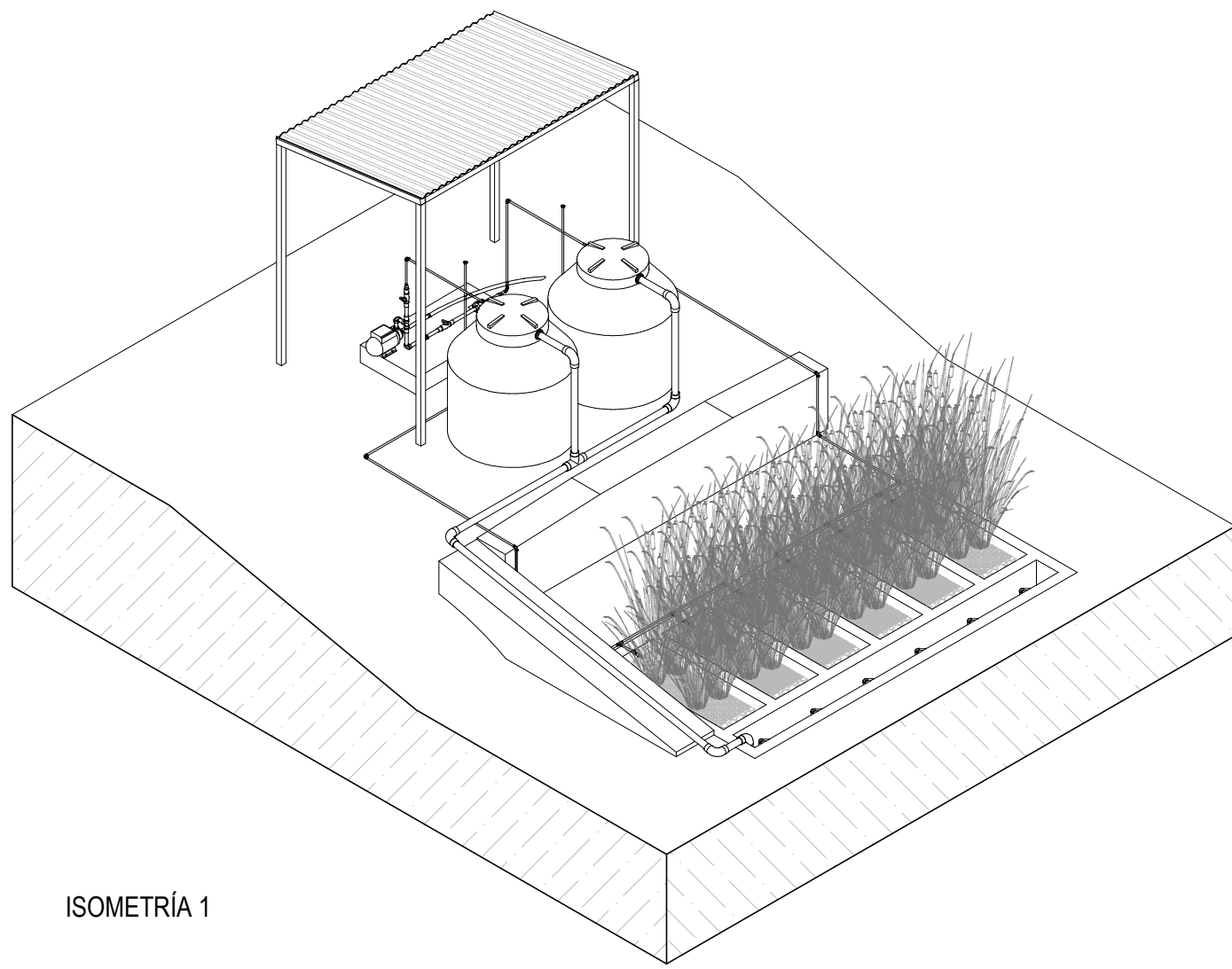
SECCIÓN A-A
ESC. 1:50



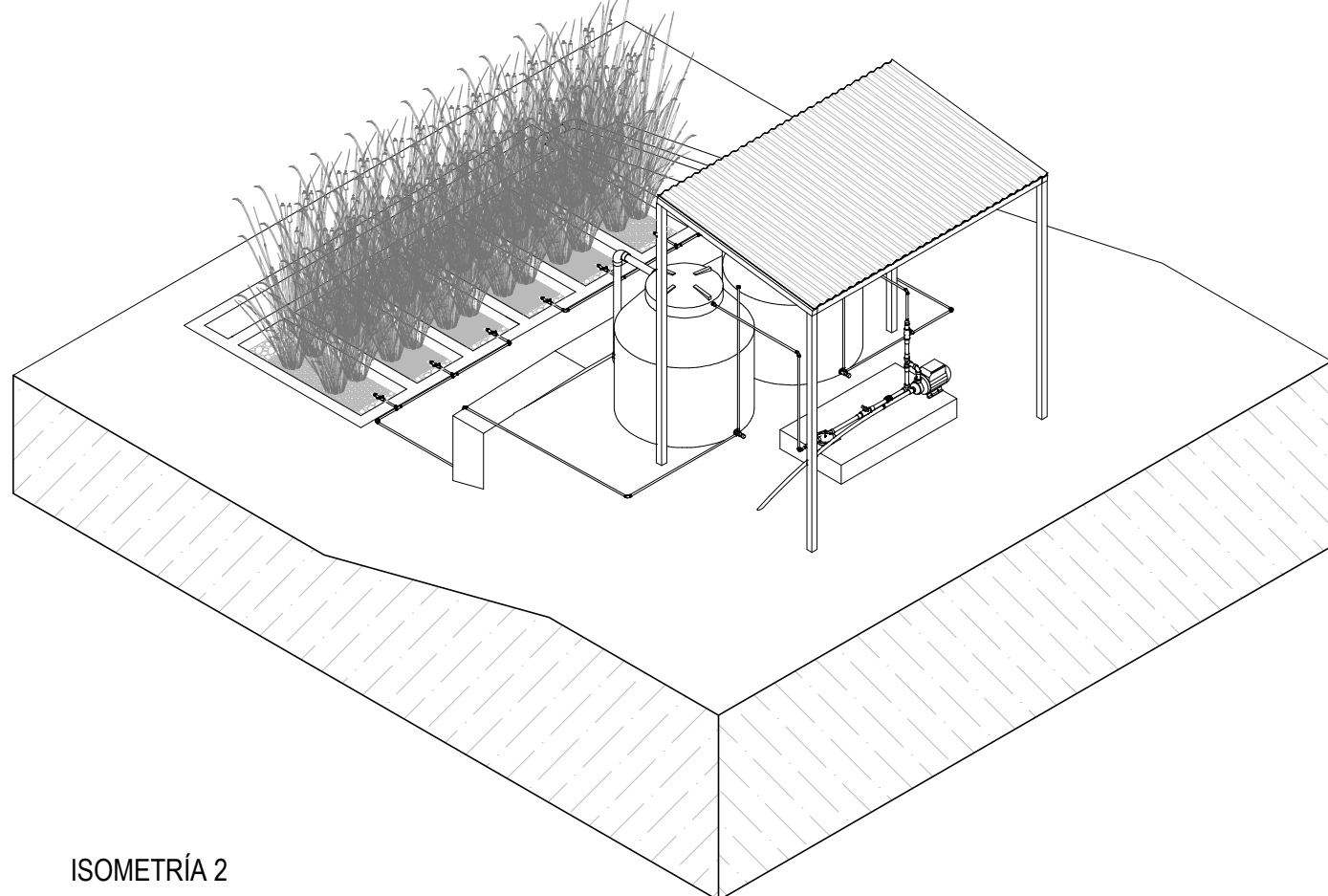
SECCIÓN B-B
ESC. 1:50



SECCIÓN C-C
ESC. 1:50

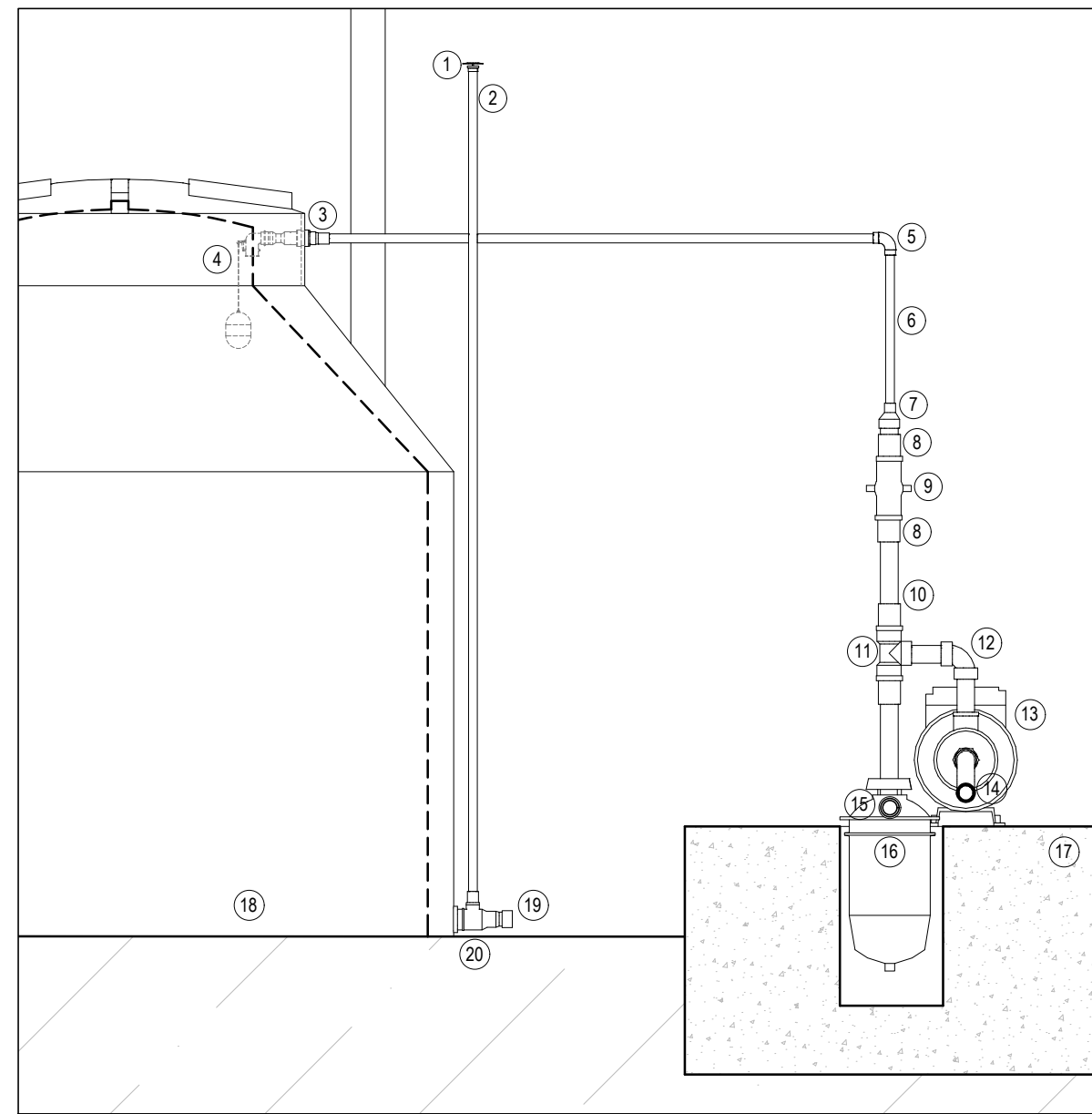


ISOMETRÍA 1



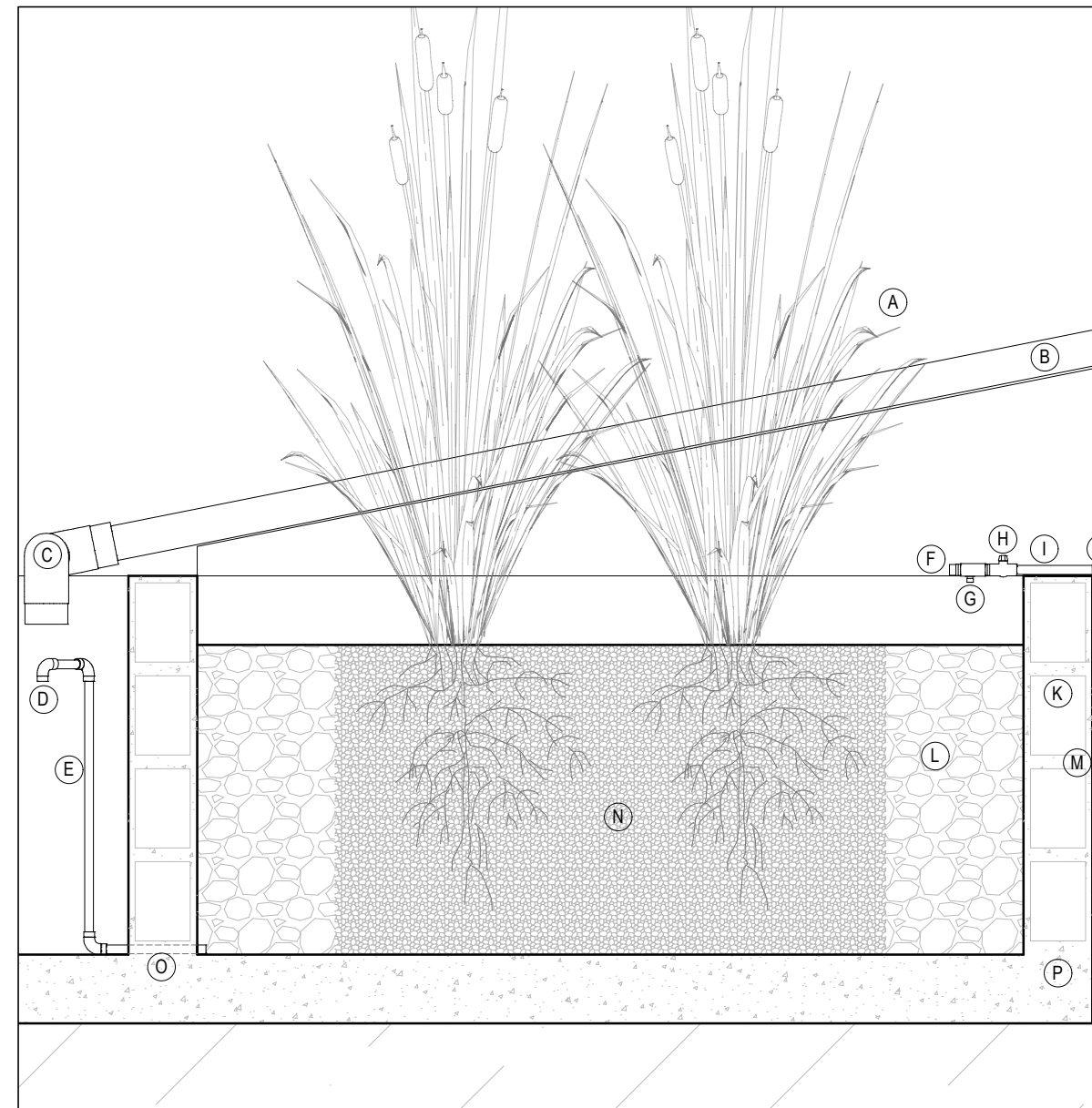
ISOMETRÍA 2

DETALLE 1: Tuberías y accesorios | Esc. 1:10



- Sombrero de ventilación.
- Tubo para nivel Ø 1/2".
- Entrada con adaptador a la válvula de llenado accesorios de Ø 1/2".
- Válvula de llenado y flotador para cisterna.
- Codo de 90° PVC SAP Ø 1/2".
- Tubería PVC SAP Ø 1/2".
- Niple+Reductor PVC SAP de Ø 3/4" @ Ø 1/2".
- Adaptador PVC SAP de Ø 3/4".
- Válvula bola PVC SAP Ø 3/4".
- Niple+Reductor PVC SAP de Ø 1" @ Ø 3/4".
- Tee PVC SAP de Ø 1".
- Codo hembra de 90°, HDPE Ø 1"+ empalme y acoplador F°G° Ø 1".
- Electrobomba 1/2 HP, entrada y salida Ø 1".
- Entrada (tubería HDPE Ø 1").
- Tubería PVC SAP Ø 3/4".
- Filtro Estándar con salida y entrada de Ø 3/4".
- Dado de concreto simple con hoyo para filtro estándar.
- Tanque cisterna de polietileno de 600L con tapa.
- Multiconector con salida a tubería de ventilación y tubería PVC SAP Ø 1/2" hacia humedales.
- Losa ó piso de concreto para humedal 1:12; e = 0.10 m; pendiente 0.5%.

DETALLE 2: Humedales | Esc. 1:10



- "Totora" Typha agustifolia.
- Tubería rebose PVC SAP de Ø 2" (viene del tanque cisterna).
- Codo 90° PVC SAP de Ø 2" (rebose viene del cisterna).
- Salida (efluente) del humedal con codo PVC SAP de Ø 1/2".
- Tubería PVC SAP de Ø 1/2".
- Entrada (afluente) hacia humedal con adaptador HDPE de Ø 1/2".
- Gotero ajustable HDPE de Ø 1/4".
- LLave de paso PVC SAP de Ø 1/2".
- Tubería PVC SAP de Ø 1/2".
- Tee PVC SAP de Ø 1/2".
- Muro de ladrillo aparejo tipo canto (24"11.5cm*8cm).
- Piedra (sustrato) de Ø 2".
- Junta o mortero 0.015 m.
- Sustrato (piedra chancada) de Ø 1/4", Ø 1/2", Ø 3/4".
- Tubería PVC SAP de Ø 1/2" (salida del humedal).
- Losa ó piso de concreto para humedal 1:12; e = 0.10 m; pendiente 0.5%.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO - PERÚ
2024

UBICACIÓN:
Región : AYACUCHO
Provincia : HUAMANGA
Distrito : JESÚS NAZARENO
Anejo : LA TOTORA
Lugar : LA TOTORA

PROYECTO: EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023

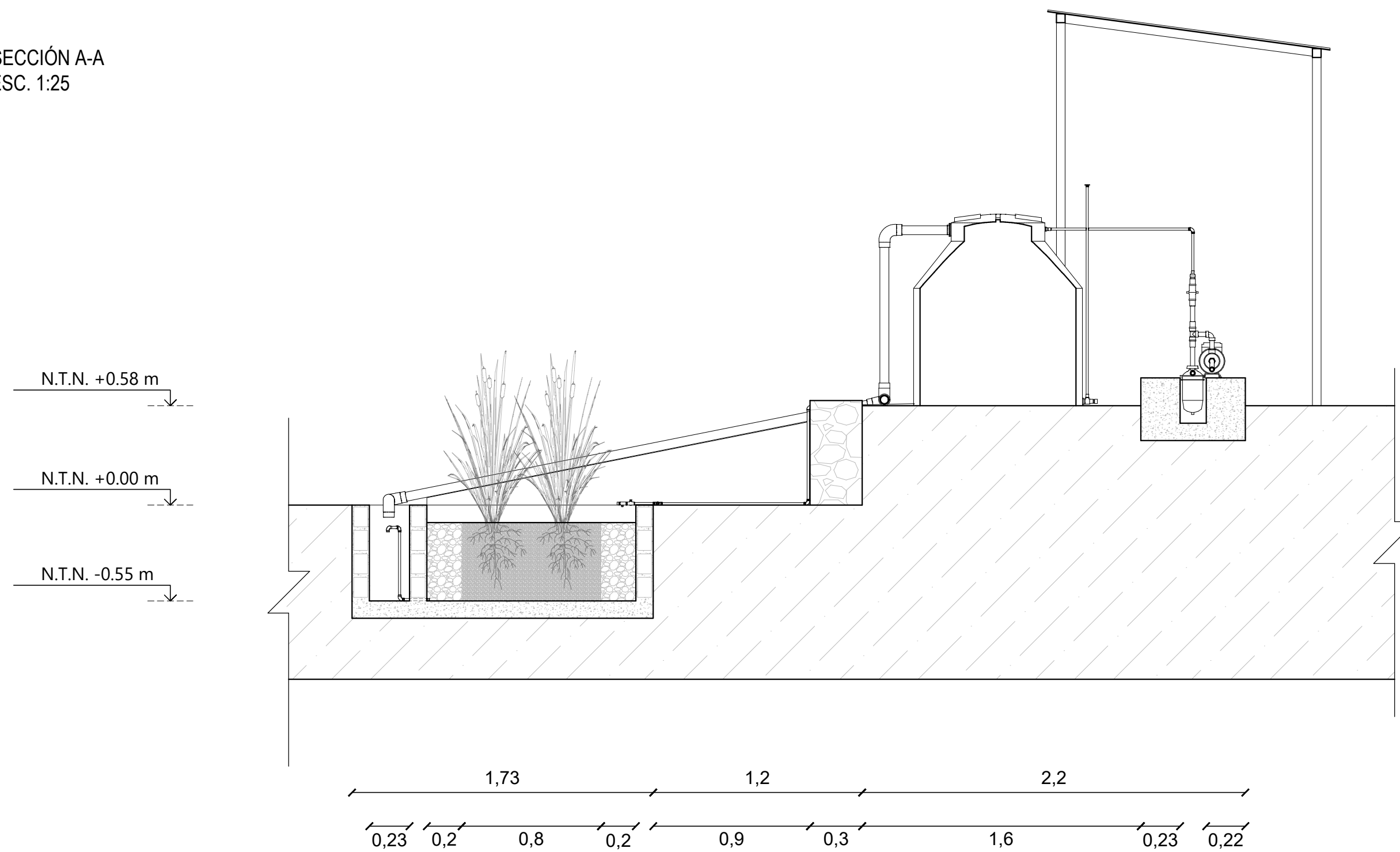
PLANO: PLANTA, CORTE, ISOMETRÍA Y
DETALLES DEL PROYECTO

LEVANTAMIENTO: DISEÑO: DIBUJO: ESCALA:
C. SOTO P. INDICADA

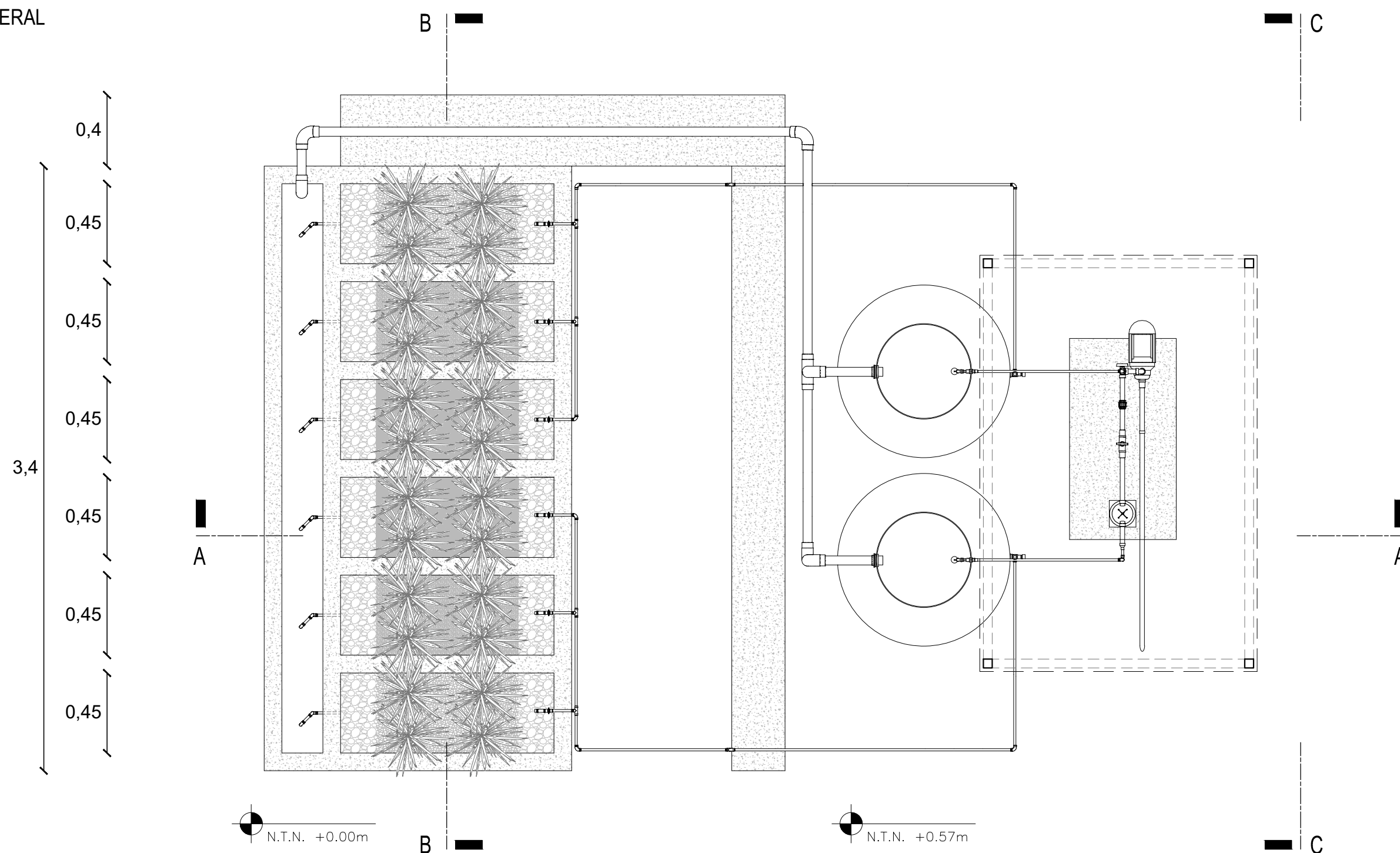
LÁMINA
LH-1

ENERO - 2024

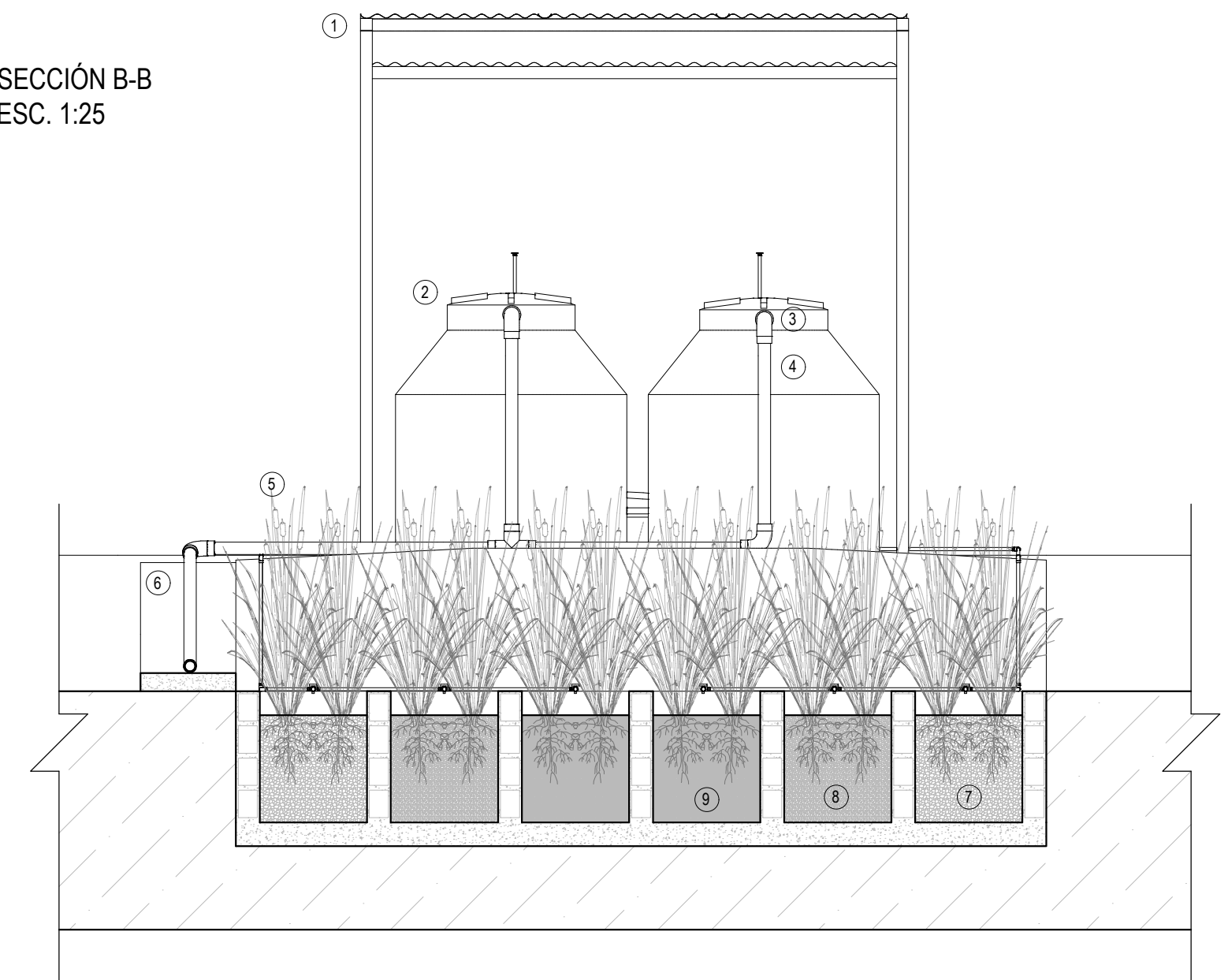
SECCIÓN A-A
ESC. 1:25



PLANO GENERAL
ESC. 1:25



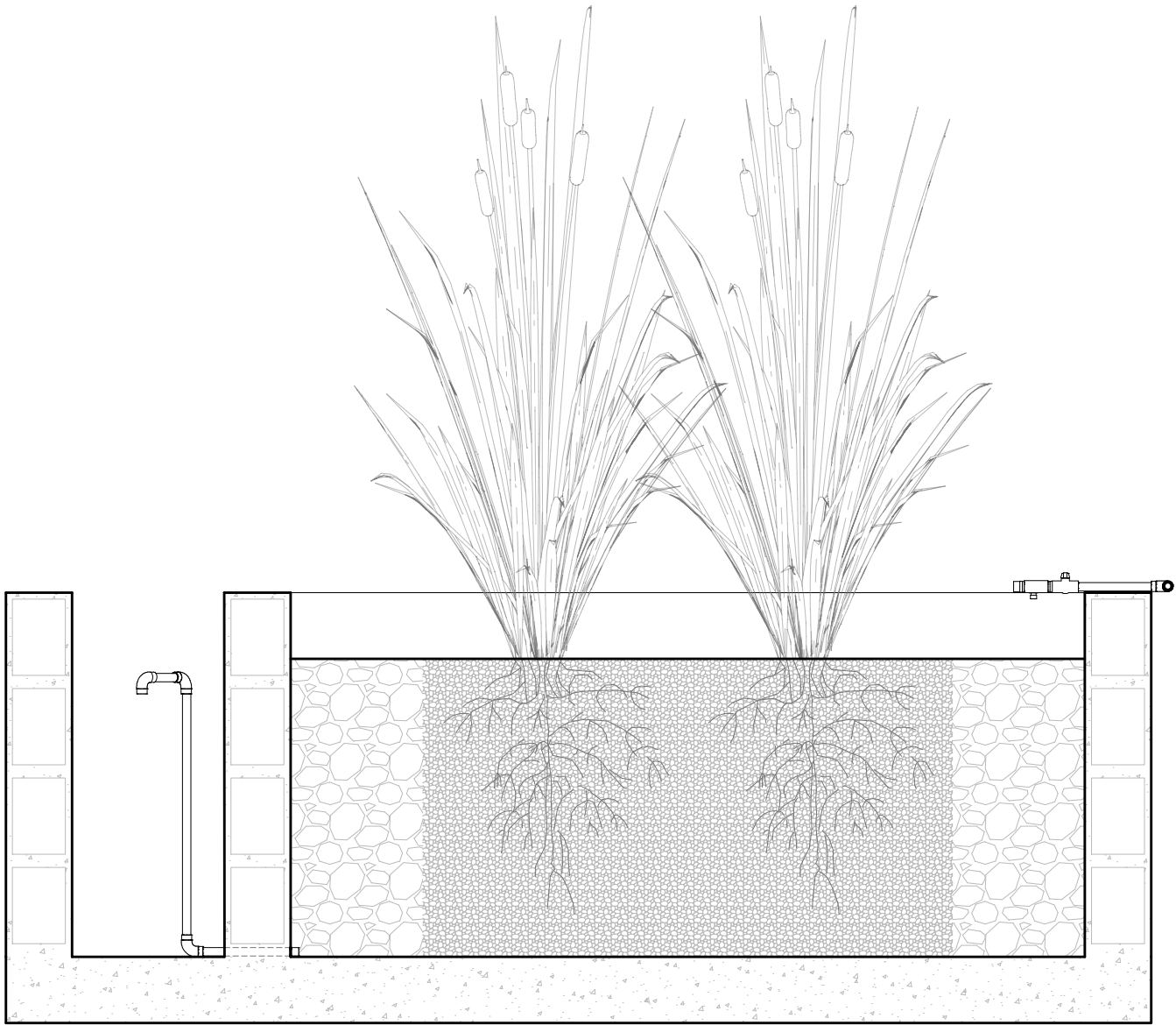
SECCIÓN B-B
ESC. 1:25



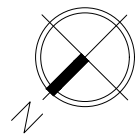
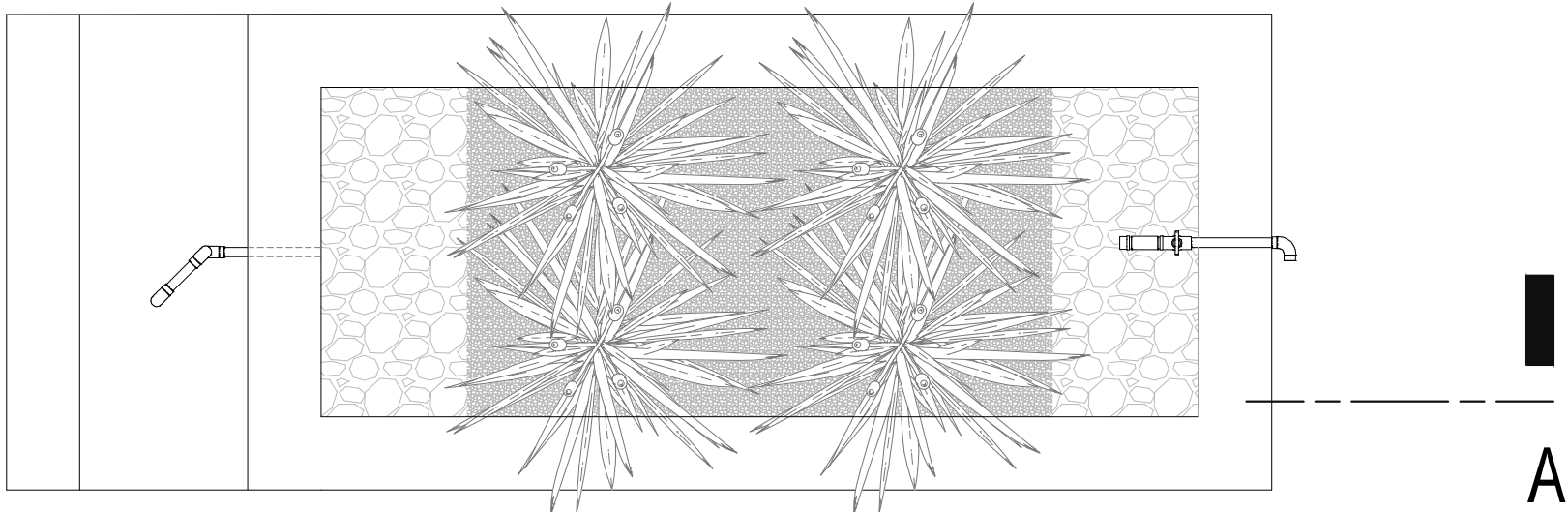
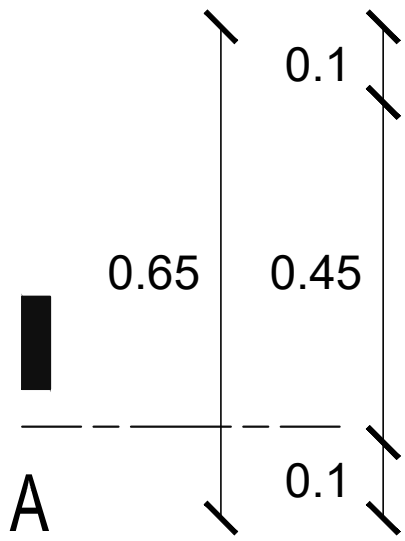
LEYENDA

1. Techo o cubierta de calamina soportado en listones (columnas, vigas y correa) de 2"x2" y 1.5"x1.5"
2. Tanque cisterna de polietileno de 600L con tapa.
3. Niple+embone+codo de rebose PVC SAP Ø 2".
4. Tubería PVC SAP Ø 2".
5. "Totora" Typha agustifolia (macrófitas).
6. Tubería PVC SAP Ø 2" baja hacia poza de evacuación o descarga de los humedales artificiales.
7. Sustrato (piedra chancada) de Ø 3/4".
8. Sustrato (piedra chancada) de Ø 1/2".
9. Sustrato (piedra chancada) de Ø 1/4".

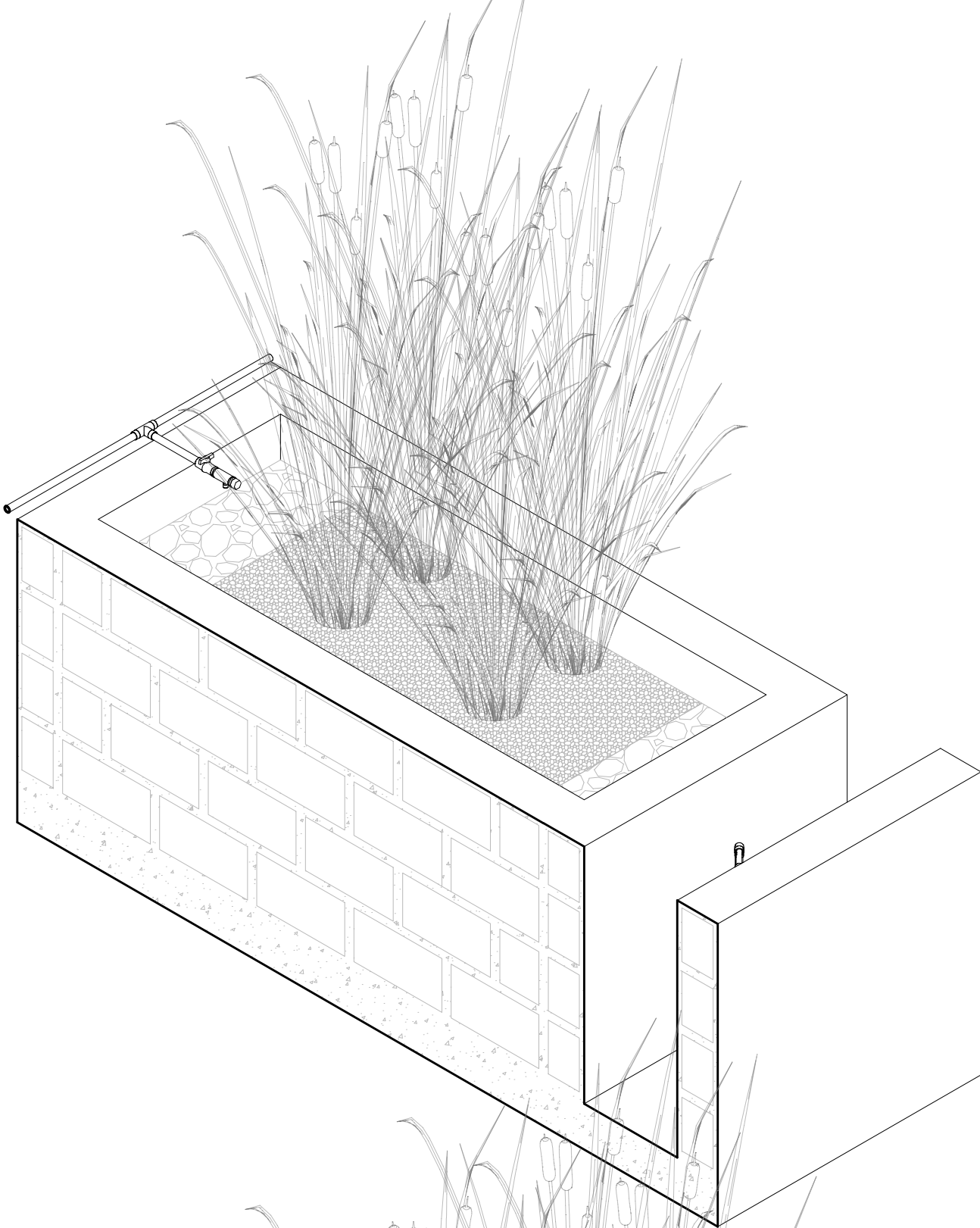
SECCIÓN HUMEDALES A-A
ESC. 1:10



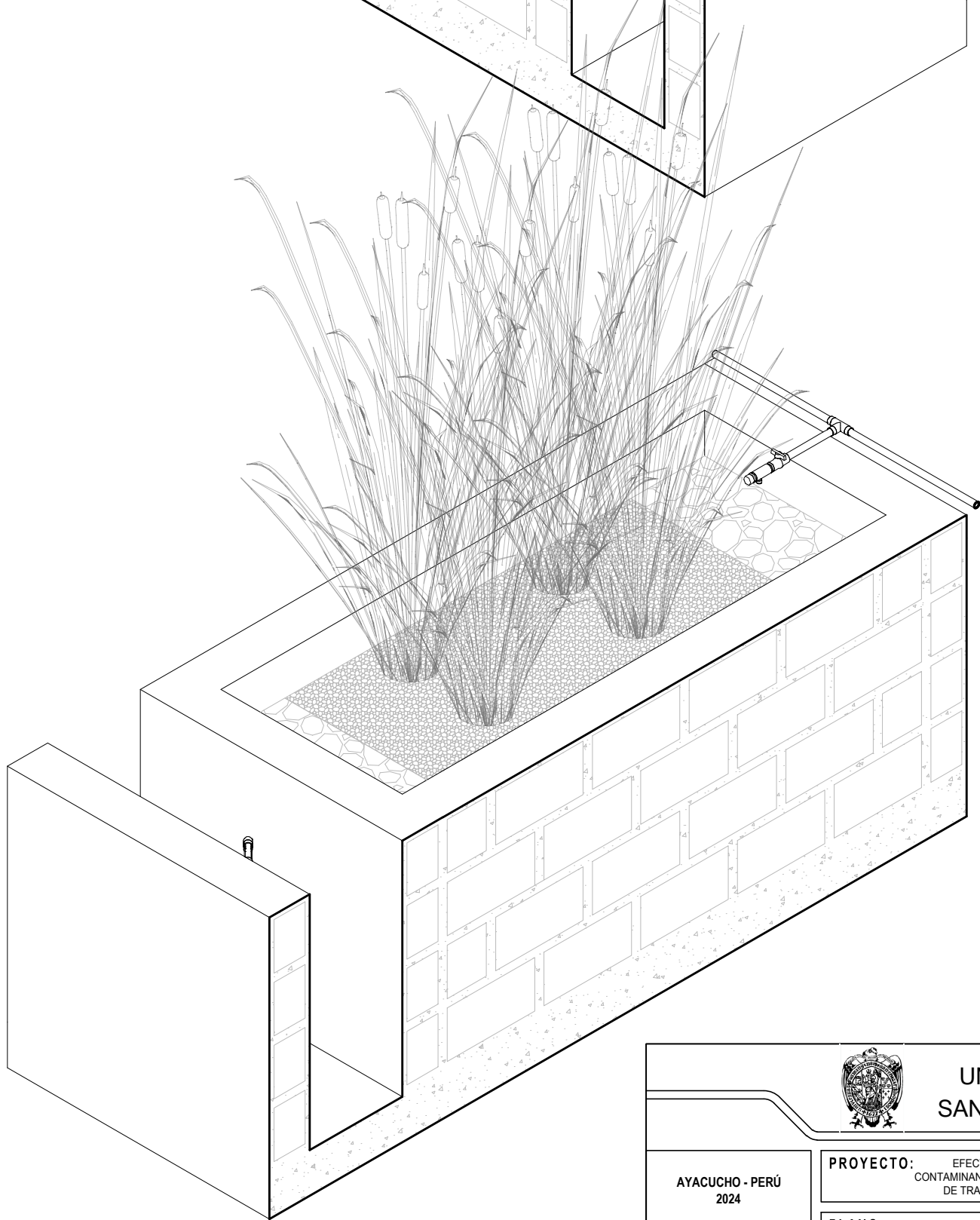
PLANO HUMEDALES
ESC. 1:10



ISOMETRÍA 1
ESC. 1:10



ISOMETRÍA 2
ESC. 1:10



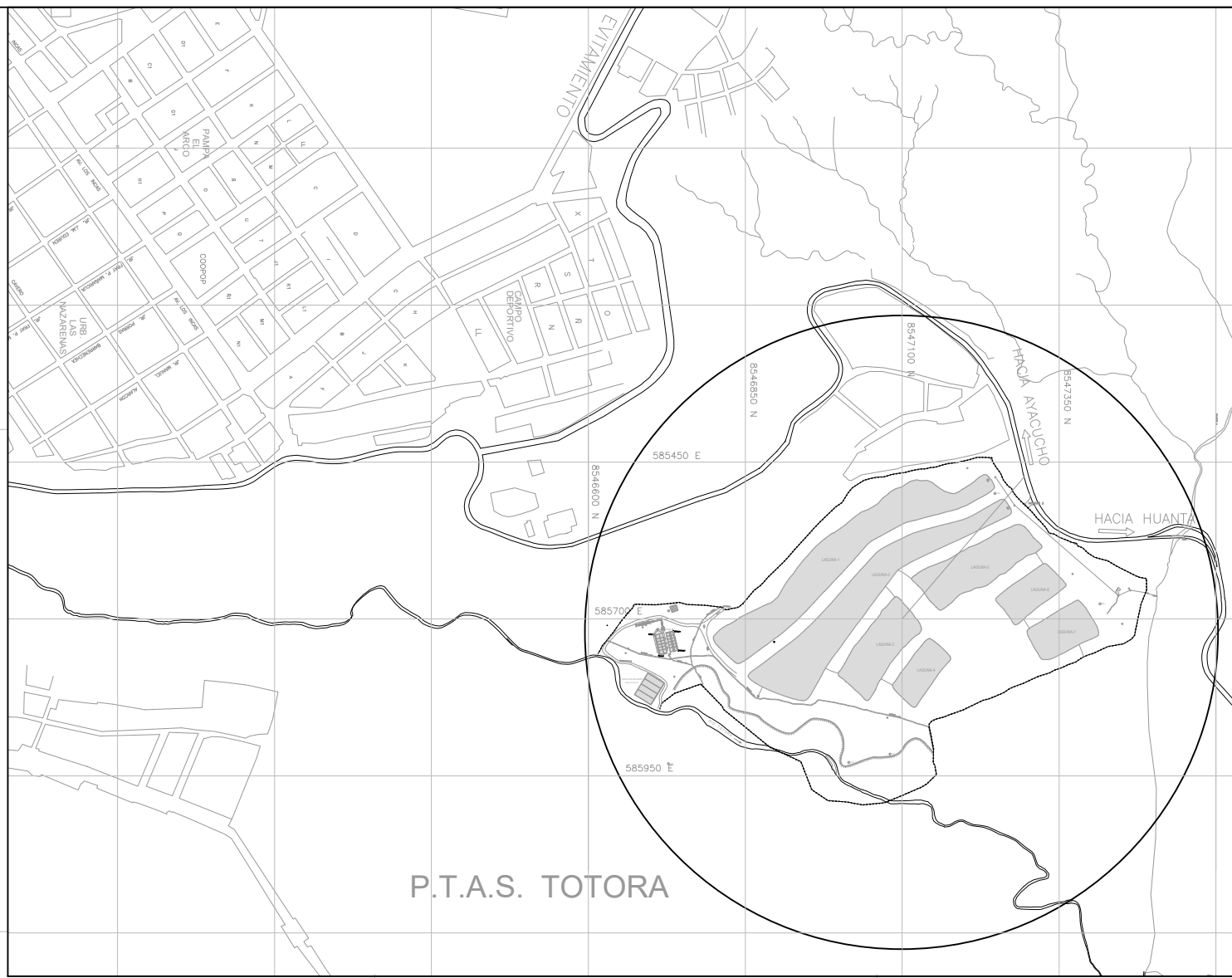
		UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA	
AYACUCHO - PERÚ 2024		PROYECTO: EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023	
UBICACIÓN: Región Provincia Distrito Avenso Lugar	AYACUCHO HUAMANGA JESÚS NAZARENO LA TOTORA LA TOTORA	PLANO:	LÁMINA
		PLANTA, CORTE E ISOMETRÍA DE HUMEDAL	LH-3
LEVANTAMIENTO:	DISEÑO:	DIBUJO: C. SOTO P.	ESCALA: 1:10 ENERO - 2024

SISTEMA WGS-84			
POLIGONAL DE APOYO			
PUNTO	NORTE	ESTE	ELEVACION
CES-001	8549138.3549	583445.0126	2795.8467
CES-002	8547916.0893	585797.7690	2606.9249

PUNTOS AUXILIARES			
PUNTO	NORTE	ESTE	ELEVACION
A	8547247.7951	585500.0760	2628.6040
B	8546727.6418	585930.4382	2648.6700
C	8547014.9405	585928.3787	2620.4900
D	8547080.6774	585915.1047	2619.8090
E	8547415.2885	585675.8191	2620.8500

PUNTOS DE CONTROL TOPOGRAFICO			
PUNTO	NORTE	ESTE	ELEVACION
H-1	8546741.5129	585752.2759	2632.7635
H-2	8546889.9511	585661.4541	2630.5580

LEYENDA	
	CURVAS MAESTRAS
	CURVAS SECUNDARIAS
	RIO
	ESCARPA
	TROCHA CARROZABLE
	ACEQUIA, CANAL
	LAGUNA DE OXIDACION
	LIMITE DE PROPIEDAD, CERCO
	PTOS. DE CONTROL TOPOGRAF.
	PTOS. DE CONTROL AUXILIAR
	POSTE
	BUZON
	NIVEL DE ESTRUCTURA



UBICACION
ESC. 1:10000

PLANO EN PLANTA
ESCALA 1:1250

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO - PERÚ
2024

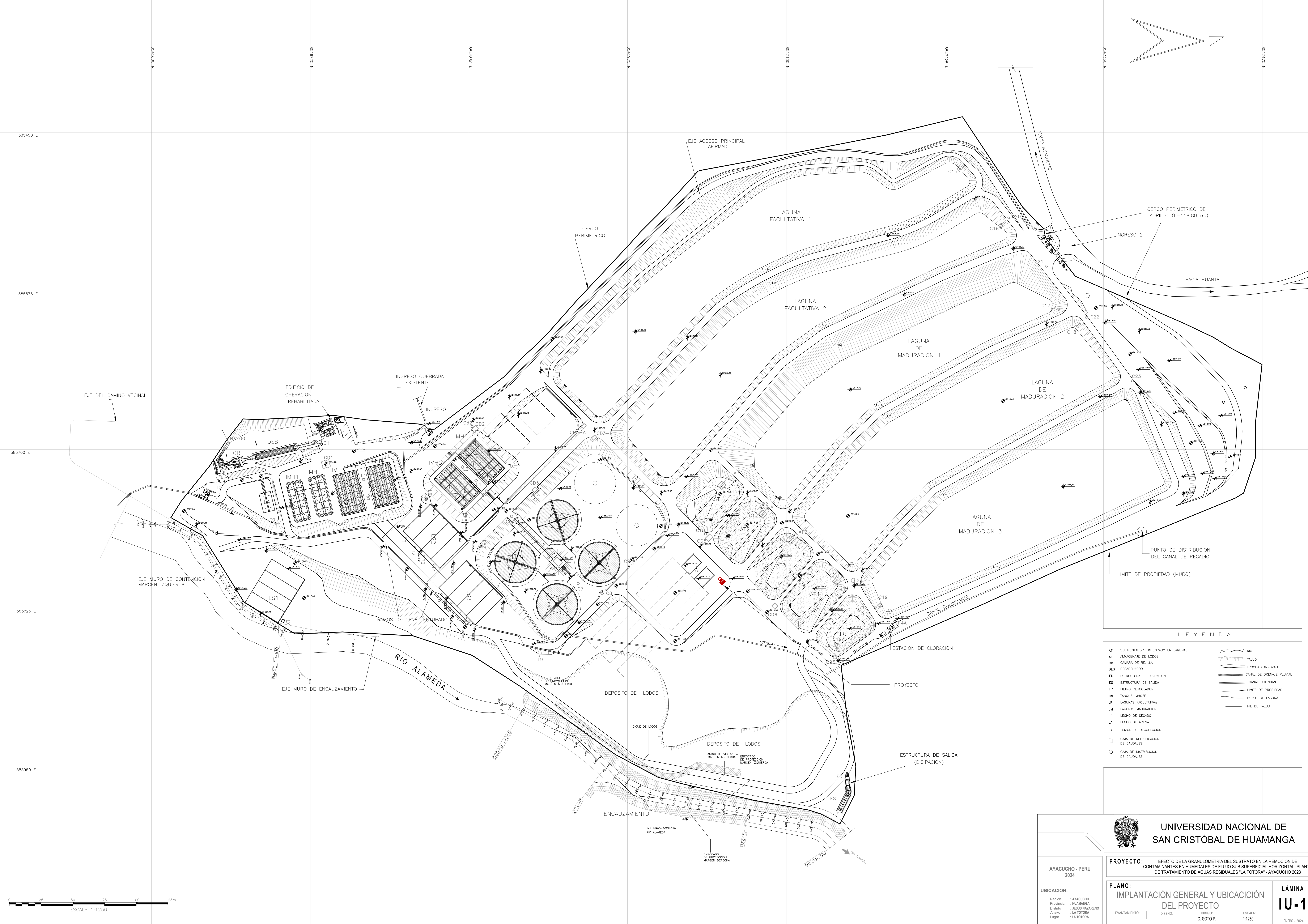
UBICACIÓN:
Región: AYACUCHO
Provincia: HUAMANGA
Distrito: JESUS NAZARENO
Anexo: LA TOTORA
Lugar: LA TOTORA

PROYECTO: EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023

PLANO: UBICACIÓN Y LOCALIZACIÓN

LEVANTAMIENTO: DISEÑO: DIBUJO: ESCALA:
C. SOTO P. INDICADA

LÁMINA
UL-01
ENERO - 2024



LEYENDA	
AT	SEDIMENTADOR INTEGRADO EN LAGUNAS
AL	ALMACENAJE DE LODOS
CR	CAMARA DE REJILLA
DES	DESARENADOR
ED	ESTRUCTURA DE DISIPACION
ES	ESTRUCTURA DE SALIDA
FP	FILTRO PERCOLADOR
IMF	TANQUE IMHOFF
LF	LAGUNAS FACULTATIVAS
LW	LAGUNAS MADURACION
LS	LECHO DE SECADO
LA	LECHO DE ARENA
TI	BUZON DE RECOLECCION
□	CAJA DE REUNIFICACION DE CAUDALES
○	CAJA DE DISTRIBUCION DE CAUDALES
	RIO
	TALUD
	TROCHA CARROZABLE
	CANAL DE DRENAJE PLUVIAL
	CANAL COLINDANTE
	LIMITE DE PROPIEDAD
	BORDE DE LAGUNA
	PIE DE TALUD



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

AYACUCHO - PERÚ
2024

UBICACIÓN:
Región: AYACUCHO
Provincia: HUAMANGA
Distrito: JESUS NAZARENO
Anejo: LA TOTORA
Lugar: LA TOTORA

PROYECTO:
EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" - AYACUCHO 2023

PLANO:
IMPLANTACIÓN GENERAL Y UBICACIÓN DEL PROYECTO

LEVANTAMIENTO: DISEÑO: DIBUJO: ESCALA:
C. SOTO P. C. SOTO P. 1:1250

LÁMINA
IU-1

ENERO - 2024

Anexo 7. Porcentaje (%) de Remoción de contaminantes evaluados por mes en los
efluentes de los HAFSSH - 2023

Porcentaje (%) de Remoción de contaminantes evaluados por mes en los efluente de los HAFSSH - 2023

$$x = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) \times 100$$

Mes	Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica	Sólidos totales disueltos (TDS)	Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	Coliformes fecales	Fosfatos	Nitratos
Abril	Efluente Ø 1/4"	4.43%	9.16%	26.88%	39.01%	82.11%	89.55%	55.14%	34.59%
	Efluente Ø 1/2"	3.80%	8.77%	16.25%	34.51%	80.00%	85.00%	46.68%	27.88%
	Efluente Ø 3/4"	2.53%	7.74%	12.19%	28.17%	78.95%	77.73%	32.55%	21.67%
		3.59%	8.56%	18.44%	33.90%	80.35%	84.09%	44.79%	28.05%
Mayo	Efluente Ø 1/4"	3.47%	7.35%	29.24%	28.50%	87.08%	86.79%	46.73%	37.62%
	Efluente Ø 1/2"	2.48%	6.84%	26.29%	19.43%	85.96%	85.00%	34.53%	31.07%
	Efluente Ø 3/4"	1.98%	4.00%	19.92%	15.76%	82.58%	82.14%	24.25%	24.03%
		2.64%	6.06%	25.15%	21.23%	85.21%	84.64%	35.17%	30.91%
Junio	Efluente Ø 1/4"	2.68%	6.01%	33.06%	28.81%	89.81%	82.94%	43.18%	32.83%
	Efluente Ø 1/2"	1.34%	5.37%	30.65%	21.19%	88.83%	76.47%	36.66%	30.55%
	Efluente Ø 3/4"	0.89%	2.56%	26.69%	16.10%	85.44%	71.76%	33.93%	25.62%
		1.64%	4.65%	30.13%	22.03%	88.03%	77.06%	37.92%	29.66%
Julio	Efluente Ø 1/4"	9.18%	2.83%	35.47%	28.29%	86.29%	85.00%	38.44%	32.34%
	Efluente Ø 1/2"	6.28%	1.88%	29.53%	25.75%	84.26%	81.11%	33.98%	27.06%
	Efluente Ø 3/4"	3.86%	1.35%	24.38%	21.41%	82.23%	80.00%	25.35%	23.17%
		6.44%	2.02%	29.79%	25.15%	84.26%	82.04%	32.59%	27.52%
Agosto	Efluente Ø 1/4"	4.02%	2.12%	34.58%	26.81%	87.36%	86.00%	36.94%	31.82%
	Efluente Ø 1/2"	3.02%	1.37%	30.93%	23.48%	85.71%	84.00%	32.38%	27.84%
	Efluente Ø 3/4"	1.51%	1.00%	29.07%	18.84%	84.62%	81.60%	30.83%	23.01%
		2.85%	1.50%	31.53%	23.04%	85.90%	83.87%	33.38%	27.56%
PROMEDIO TOTAL		3.43%	4.56%	27.01%	25.07%	84.75%	82.34%	36.77%	28.74%



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 032-2024-FIMGC:

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 422-2024-FIMGC-D y al Memorando N° 271-2024-FIMGC**, a los diecinueve días del mes de junio de 2024, siendo las 10:00 a.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del MSc. Moisés Nico BARBARÁN ORIUNDO, y los miembros; MSc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO, MSc. Edwin Carlos GARCÍA SAEZ, MSc. Edward LEÓN PALACIOS, actuando como secretario docente el MSc. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

CARLOS FARES SOTO PRETEL

Quien presentó la tesis denominada:

Efecto de la granulometría del sustrato en la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub superficial horizontal, planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” – Ayacucho 2023

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO CON NOTA DIECISEIS (16)

Siendo las

12:10 p.m. del día 19 de junio de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Moisés Nico BARBARÁN ORIUNDO
Presidente

MSc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

MSc. Edwin Carlos GARCÍA SAEZ
Miembro

MSc. Edward LEÓN PALACIOS
Miembro

MSc. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente de la FIMGC



UNSH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 106-2024-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 476-2023-FIMGC-UNSH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : CARLOS FARES SOTO PRETEL
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "LA TOTORA" – AYACUCHO 2023
Evaluación de la Originalidad : 23 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2424910105

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 30 de julio 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Msc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA TOTORA” – AYACUCHO 2023

por CARLOS FARES SOTO PRETEL

Fecha de entrega: 30-jul-2024 12:22p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2424910105

Nombre del archivo: Carlos_Fares_Soto_Pretel.pdf (10.25M)

Total de palabras: 28827

Total de caracteres: 157828

EFFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DEL SUSTRATO EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE FLUJO SUB SUPERFICIAL HORIZONTAL, PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA TOTORA” – AYACUCHO 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	24%	10%	12%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	Fuente de Internet	6%
2	pt.slideshare.net	Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	Trabajo del estudiante	1%
4	1library.co	Fuente de Internet	1%
5	hupanam.com	Fuente de Internet	1%
6	www.cuhs.otalca.cl	Fuente de Internet	1%
7	agua.org.mx	Fuente de Internet	1%

8	Fuente de Internet	1 %
9	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	1 %
10	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	1 %
11	repositorio.unam.edu.pe Fuente de Internet	1 %
12	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.utp.edu.co Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %
17	bvearmb.do Fuente de Internet	<1 %
18	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
19	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	

<1 %

20

rus.ucf.edu.cu

Fuente de Internet

<1 %

21

www.eula.cl

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to Universidad Laica Vicente
Rocafuerte de Guayaquil

Trabajo del estudiante

<1 %

23

Submitted to tec

Trabajo del estudiante

<1 %

24

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

25

dspace.esPOCH.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

26

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

27

repositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

28

documentop.com

Fuente de Internet

<1 %

29

mapasconagua.net

Fuente de Internet

<1 %

30

repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

31

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1 %

32

go.gale.com

Fuente de Internet

<1 %

33

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

34

Submitted to Universidad Europea de Madrid

Trabajo del estudiante

<1 %

35

purl.org

Fuente de Internet

<1 %

36

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

37

repositorio.unu.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

38

Submitted to Universidad Peruana Union

Trabajo del estudiante

<1 %

39

Submitted to Instituto Superior de Artes,
Ciencias y Comunicación IACC

Trabajo del estudiante

<1 %

40

cia.uagraria.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

41

repositorio.unap.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

42

revistabiociencias.uan.edu.mx

Fuente de Internet

<1 %

43

Submitted to Universidad Tecnológica
Centroamericana UNITEC

Trabajo del estudiante

<1 %

44

www.capacidaddepurativahidrocarburos.utp.ac.pa

Fuente de Internet

<1 %

45

Submitted to Universidad San Francisco de
Quito

Trabajo del estudiante

<1 %

46

repositorio.unjfsc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

47

Submitted to Universidad Nacional del Centro
del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

48

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

49

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

50

bdigital.unal.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

51

prezi.com

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo