

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“SISTEMA INTEGRADO TANQUE SÉPTICO Y HUMEDAL DE FLUJO
HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
DOMÉSTICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AGRÍCOLA

EVELYN MILAGROS PORTILLA BENAVENTE

LIMA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“SISTEMA INTEGRADO TANQUE SÉPTICO Y HUMEDAL DE FLUJO
HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
DOMÉSTICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentada por:

BACH. EVELYN MILAGROS PORTILLA BENAVENTE

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. JOSÉ LUIS CALLE MARAVÍ

Presidente

Mg. Sc. ROSA MARÍA MIGLIO TOLEDO
DE RODRÍGUEZ

Asesora

Ing. CARLOS ALBERTO BRAVO AGUILAR

Miembro

Ing. ROSEMARY VELA CARDICH

Miembro

LIMA – PERÚ
2019

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Agua Residual:	3
2.2 Características de las aguas residuales:.....	4
2.2.1 Características físicas:	4
2.2.2 Características químicas:	6
2.2.3 Características Biológicas:	7
2.3 Tratamiento de aguas residuales	11
2.3.1 Niveles de tratamiento para aguas residuales:	11
2.3.2 Sistemas biológicos:.....	12
2.4 Tanque Séptico:	15
2.4.1 Dimensiones de un tanque séptico:	15
2.4.2 Operación y mantenimiento del tanque séptico:.....	17
2.4.3 Procesos dentro del tanque séptico:	18
2.5 Humedales Artificiales:.....	20
2.5.1 Tipos de Humedales Artificiales:.....	20
2.5.2 Componentes de los humedales artificiales:.....	22
2.5.3 Tipos de plantas en los humedales:	23
2.5.4 Experiencias con la planta ornamental <i>Zantedeschia aethiopica</i> , utilizada en humedales construidos:	24
2.5.5 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales:	31
2.6 Marco legal del Tratamiento de Aguas Residuales	36
2.7 Tiempo de retención hidráulica (THR) en reactores:	39
2.7.1 Sustancias trazadoras para determinar el tiempo de retención:	40
2.8 Descripción del sistema integrado de tratamiento	47
III. MATERIALES Y METODOS	55
3.1 Adecuación del sistema:.....	55
3.2 Monitoreo de la calidad del agua en el sistema de tratamiento:.....	57
3.2.1 Número de muestras:.....	60
3.2.2 Eficiencia de remoción:	60
3.3 Evaluación del crecimiento de la especie vegetal:	61
3.4 Parámetros de operación del tanque séptico:	61
3.5 Parámetros de operación del humedal artificial:	61

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
4.1 Adecuación del sistema:.....	63
4.1.1 Estado del sistema:	63
4.1.2 Evaluación del tiempo y frecuencia de bombeo:	65
4.1.3 Medición de caudales:	65
4.2 Monitoreo de la calidad del agua:.....	67
4.3 Evaluación del crecimiento de la especie vegetal:	78
4.4 Parámetros de operación del tanque séptico:	81
4.4.1. Tiempo de retención:.....	81
4.5 Parámetros de Operación del humedal horizontal:	81
4.5.1 Tiempo de retención:.....	81
4.5.2 Carga hidráulica:	82
4.5.3 Carga orgánica superficial:	82
4.5.4 Determinación del área requerida por habitante equivalente:	82
V. CONCLUSIONES.....	83
VI. RECOMENDACIONES	84
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS	85
VIII. ANEXOS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de agua residual y características	3
Tabla 2: Los organismos específicos que han sido empleados o propuestos como indicadores de la contaminación humana.....	9
Tabla 3: Composición típica del agua domestica bruta	10
Tabla 4: Niveles de tratamiento.....	11
Tabla 5: Características de los principales niveles de tratamiento de aguas residuales.....	12
Tabla 6 : Principales procesos de tratamiento biológico en aguas residuales	14
Tabla 7 : Valores promedios obtenidos durante la investigación	25
Tabla 8: Porcentaje de eliminación de contaminantes para (a) el período completo del estudio, y (b) solo para los últimos dos meses del estudio.....	26
Tabla 9: La concentración de contaminantes de las aguas residuales domésticas en los humedales de tratamiento de flujo subsuperficial	27
Tabla 10: Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA: sistemas de plantas acuáticas, HFS: humedales de flujo superficial, HFSS: humedales de flujo subsuperficial y HFV: humedales con flujo vertical	35
Tabla 11: Eficiencias típicas de eliminación de los principales tipos de humedales de tratamiento.....	36
Tabla 12: Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR	39
Tabla 13: Criterios para el análisis de la curva de tendencia	46
Tabla 14: Equipos utilizados en campo	59
Tabla 15: Equipos utilizados en laboratorio	59
Tabla 16: Número de análisis por parámetros.....	60
Tabla 17: Resultados de medición de caudal a la entrada del tanque séptico	65
Tabla 18: Resultados de medición de caudal a la salida del tanque séptico	66
Tabla 19: Resultados de medición de caudal en la salida del humedal	67
Tabla 20: Resumen de los valores promedios y porcentajes de remoción del monitoreo de la calidad del agua.....	77
Tabla 21: Promedio de flores	79
Tabla 22: Tamaño de raíces.....	80
Tabla 23: Área requerida por habitante equivalente	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición de los sólidos en aguas residuales	4
Figura 2: Clasificación de los organismos patógenos en aguas residuales	7
Figura 3: Dimensiones del tanque séptico.....	17
Figura 4 : Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal.....	21
Figura 5: Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical	21
Figura 6: Planta ornamental <i>Zantedeschia Aethiopica</i>	29
Figura 7: Aplicación de trazadores en un reactor	41
Figura 8: Curva de $1-F(t)$, cantidad del trazador que permanece en el reactor	44
Figura 9: Concentración del trazador en el efluente de un reactor	45
Figura 10: Índice de Morrill	47
Figura 11: Esquema general de la PTAR	49
Figura 12: Caja de Extraccion de lodos	50
Figura 13: Vista en planta del tanque séptico.....	51
Figura 14: Vista en corte del tanque séptico	51
Figura 15: Vista en planta del humedal horizontal	52
Figura 16: Vista en corte del humedal horizontal.....	53
Figura 17: Tablero eléctrico	53
Figura 18: Bomba 1, 2, 3 y 4 ubicadas en el pozo de bombeo (EE1).....	54
Figura 19: Válvulas bola	56
Figura 20: Rizomas de <i>Zantedeschia Aethiopica</i>	57
Figura 21: Rizoma plantado a una profundidad de 15 cm	57
Figura 22: Puntos de muestreo del sistema tanque séptico y humedal	58
Figura 23: Cámara de bombeo antes de la limpieza	63
Figura 24: Cámara de bombeo limpia.....	63
Figura 25: Residuos atascados en la válvula check	64
Figura 26: Limpieza de tubería de ingreso al humedal.....	64
Figura 27: Variación de temperatura durante el periodo de muestreo.....	67
Figura 28: Variación de pH durante el periodo de muestreo	68
Figura 29: Variación de la conductividad eléctrica durante el periodo de muestreo.....	69
Figura 30: Variación de la turbiedad durante el periodo de muestreo	70
Figura 31: Variación del oxígeno disuelto en el periodo de muestreo	70
Figura 32: Variación de la DBO_5 en el periodo de muestreo	71
Figura 33: Variación de la DQO en el periodo de muestreo	72
Figura 34: Variación del Nitrógeno amoniacal en el periodo de muestreo.....	73
Figura 35: Valores de nitrato en el periodo de muestreo	73
Figura 36: Variación del Fosfato en el periodo de muestreo	74
Figura 37: Variación de SST en el periodo de muestreo	75
Figura 38: Variación de Coliformes totales en el periodo de muestreo.....	76
Figura 39: Promedio de crecimiento de plantas	78
Figura 40: Curva de variación de la concentración del trazador	81

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Cálculos de diseño del sistema integrado	91
ANEXO 2: Resultados de evaluación de parámetros en campo	92
ANEXO 3: Resultados de evaluación del sistema en el laboratorio.....	94
ANEXO 4: Evaluación de las plantas	98
ANEXO 5: Mediciones y datos de temperatura	99
ANEXO 6: Tiempo de retención	103
ANEXO 7: Galería de fotos	104

RESÚMEN

Con el propósito de proponer soluciones en las áreas que no cuentan con un servicio de desagüe y que no gestionan adecuadamente el tratamiento de sus aguas residuales, se construyó un prototipo de tratamiento dentro del Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (CEMTRAR), ubicado en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina. El prototipo está compuesto por un tanque séptico (tratamiento primario) y un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial (tratamiento secundario). Los fondos económicos fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), y el propósito fue evaluar los parámetros de operación real de este sistema integrado. En el humedal horizontal se sembró la planta ornamental comúnmente llamada alcatraz o cala, siendo su nombre científico *Zantedeschia aethiopica*, la cual se desarrolló adecuadamente dentro del humedal; luego de 4 meses de adaptación se realizó el monitoreo del sistema. Las muestras se tomaron durante 6 semanas, los puntos de muestreo fueron el agua residual cruda, salida del tratamiento primario y efluente del sistema. El caudal de entrada fue de 2.7 m³/día, obteniendo remociones de Turbiedad (89.5%), DBO₅ (85%), DQO (81%), Fosfato (36%), Sólidos Suspendedos Totales (97.5%) y Coliformes Totales (99.97%); también concentraciones de Nitrato (4.9 mg/l), a la salida del sistema.

Palabras claves: Tanque séptico, humedal subsuperficial de flujo horizontal y *Zantedeschia aethiopica*.

SUMMARY

In order to propose solutions in areas that do not have sewer service and that do not properly manage the treatment of their wastewater, a prototype treatment was built within the Model Waste Treatment Center (CEMTRAR), located on the premises of the National Agrarian University La Molina. The prototype is composed of a septic tank (primary treatment) and an artificial subsurface horizontal flow wetland (secondary treatment). The economic funds were provided by the National Training Service for the Construction Industry (SENCICO), and the purpose was to evaluate the actual operating parameters of this integrated system. In the horizontal wetland the ornamental plant commonly called alcatraz or cala was planted, being its scientific name *Zantedeschia aethiopica*, which developed properly inside the wetland; after 4 months of adaptation system monitoring was performed. Samples were taken for 6 weeks, the sampling points were raw wastewater, exit from the primary treatment and effluent from the system. The inflow was 2.7 m³/day, obtaining removals from Turbidity (89.5%), BOD₅ (85%), COD (81%), Phosphate (36%), Total Suspended Solids (97.5%) and Total Coliforms (99.97%); also nitrate concentrations (4.9 mg/l), to the system output.

Key words: Septic tank, subsurface horizontal flow wetland and *Zantedeschia aethiopica*.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más utilizados por el hombre, y como resultado de su uso se genera agua residual.

El informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del 2017, indica que el agua residual es un recurso desaprovechado, lo cual tiene repercusiones negativas en la salud humana y al medio ambiente.

Uno de los principales problemas que registra Perú, es la mala calidad del agua en los recursos superficiales; ya que existe una descarga anual de 960,5 millones de metros cúbicos de desagüe sobre el agua superficial, subterránea y marina, de las cuales el 64% pertenece a desagües domésticos (INEI, 2015).

La cobertura de tratamiento de agua residual, se estima en 70% sobre la población urbana servida por las 50 EPS que operan en el país, incluyendo a SEDAPAL. Si se excluye a SEDAPAL, esta cobertura se reduce a 44% (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2015).

En el medio rural la falta de recursos económicos y la inexistencia de personal especializado, obligan a emplear sistemas de tratamiento de bajo costo y fácil operación, como los humedales artificiales y tanques sépticos.

Teniendo en cuenta que no existen muchas experiencias reportadas sobre el uso de un sistema integral tanque séptico y humedal artificial en nuestro país, se propuso investigar un prototipo aplicable a sistemas descentralizados para ciudades de nuestro país, el cual beneficiará a la población y generará un ambiente más sano, libre de descargas contaminantes y a un bajo costo.

Objetivo principal

- Evaluar un prototipo de sistema integral tanque séptico y humedal artificial como opción para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Objetivos específicos

- Evaluar la adaptación de la especie *Zantedeschia aethiopica* en un humedal subsuperficial de flujo horizontal.
- Determinar las eficiencias del sistema integrado para la remoción de contaminantes contenidos en el agua residual.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agua Residual:

Romero (2004) menciona que “son aguas usadas y sólidos que se introducen en las cloacas, y son transportados mediante el sistema de alcantarillado. Son generadas por actividades humanas y sus características son muy diversas, dependiendo de su origen” (ver Tabla 1).

Tabla 1: Tipos de agua residual y características

Tipo de agua	Definición	Características
Agua residual domestica	Producida en las diferentes actividades al interior de las viviendas, colegio, etc.	Los contaminantes están presentes en moderadas concentraciones.
Agua residual municipal	Son las transportadas por el alcantarillado de una ciudad o población	Contiene materia orgánica, nutrientes, patógenos, etc.
Agua residual industrial	Las resultantes de las descargas de industrias	Su contenido depende del tipo de industria y/o procesos industriales.
Agua negra	Contiene orina y heces	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos farmacéuticos.
Agua amarilla	Es la orina transportada con o sin agua	Alto contenido de nutrientes, productos farmacéuticos, hormonas y alta concentración de sales.
Agua café	Agua con pequeña cantidad de heces y orina	Alto contenido de nutrientes, patógenos, hormonas y residuos.
Agua gris	Provenientes de lavamanos, duchas y lavadoras	Tiene pocos nutrientes y agente patógenos y por el contrario presentan máxima de carga de productos para el cuidado personas y detergentes

FUENTE: Adaptado de Roeleveld & Zeeman, 2006

2.2 Características de las aguas residuales:

Cubillo (2001) indica que “las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas especiales sobre las demás aguas que es necesario comprender para optimizar su manejo”.

2.2.1 Características físicas:

“Las principales características físicas de un agua residual son su contenido de sólidos, distribución de partículas por tamaño, turbiedad, color, olor, transmitancia / absorbancia, temperatura, densidad y conductividad. Se considera que la más importante es el contenido de sólidos” (Crites & Tchobanoglous, 2000).

- **Sólidos Totales**

Se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105°C. Los sólidos totales comprenden todo el material, orgánico e inorgánico, que no se evapora a dicha temperatura. Los sólidos totales o residuos de evaporación además se clasifican en filtrables (disueltos) y o no filtrables (sólidos en suspensión) (Metcalf & Eddy, 1995). La composición de los sólidos totales se representa en la Figura 1.

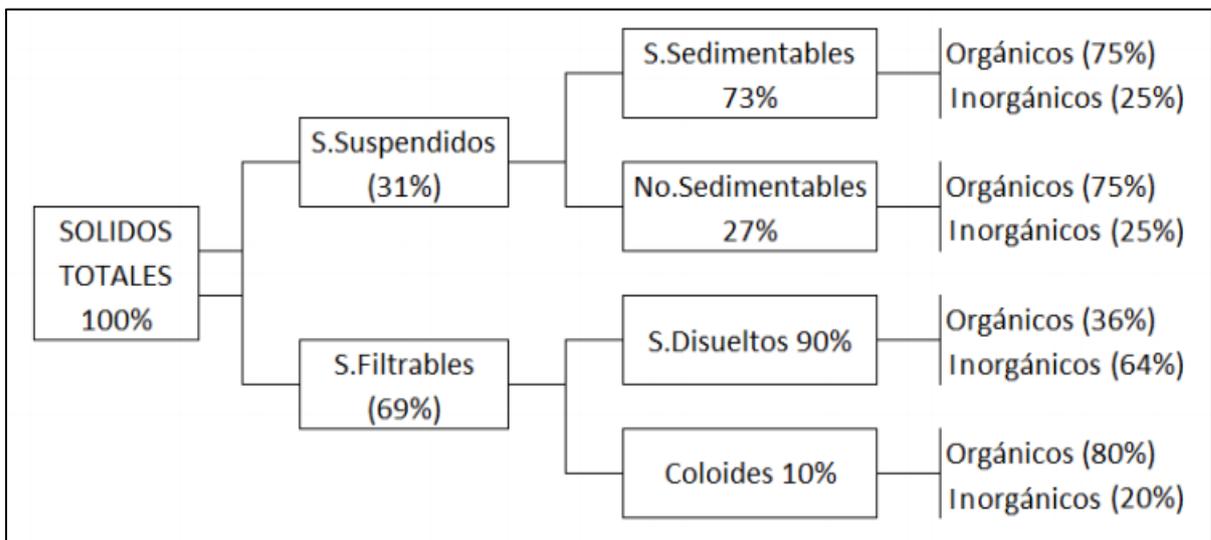


Figura 1: Composición de los sólidos en aguas residuales

FUENTE: Adaptado de Crites & Tchobanoglous, 2000

- **Turbidez:**

La turbidez o turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión. La turbidez en un agua puede ser ocasionada por una gran variedad de materiales en suspensión que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otras arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos y microorganismos (Romero, 2005).

- **Olores:**

Los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios (Metcalf & Eddy, 1995).

- **Color:**

Históricamente, para la descripción de un agua residual, se empleaba el término condición junto con la composición y la concentración. Este término se refiere a la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y su olor. El agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro. Llegando este punto, suele clasificarse el agua residual como séptica (Metcalf & Eddy, 1995).

- **Temperatura:**

La determinación exacta de la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento y análisis del laboratorio, puesto que, por ejemplo, el grado de saturación de OD, la actividad biológica y el valor de saturación con carbonato de calcio se relacionan con la temperatura (...) Para obtener buenos resultados, la temperatura debe tomarse en el sitio de muestreo (Romero, 2005).

- **Conductividad:**

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos (Romero, 2005).

2.2.2 Características químicas:

Metcalf & Eddy (1995) indican que las características químicas de las aguas residuales pueden ser agrupadas por tres grupos:

- **Materia Orgánica:**

Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro (Metcalf & Eddy, 1995).

- **Materia inorgánica:**

Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales que tiene importancia para la determinación y control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que a ella se descarguen (Metcalf & Eddy, 1995).

- **Gases**

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), y el metano (CH_4). Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2.3 Características Biológicas:

“Las aguas residuales domésticas contienen biológicamente gran cantidad de microorganismos, algunos de los cuales pueden transmitir enfermedades” (Novaro, 1998).

- **Organismos Patógenos:**

“Los organismos patógenos son capaces de infectar o transmitir enfermedades a los seres humanos y animales. La presencia o ausencia de patógenos en el agua es de suma importancia para evaluar la calidad del agua” (Drinan & Whiting, 2001).

“Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Las principales clases de organismos presentes en las aguas residuales son las bacterias, los virus y los parásitos” (Crites & Tchobanoglous, 2000).

En la Figura 2 se muestra la clasificación de los organismos patógenos en aguas residuales:

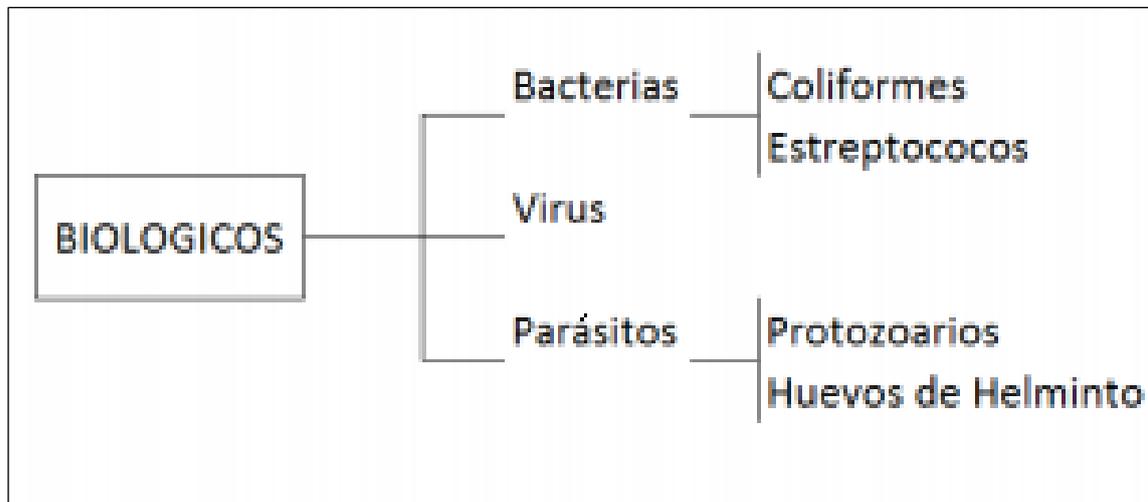


Figura 2: Clasificación de los organismos patógenos en aguas residuales

FUENTE: Adaptado de Crites & Tchobanoglous, 2000

- **Indicadores de contaminación fecal:**

El control de la calidad sanitaria de los recursos del ambiente puede llevarse a cabo mediante la enumeración de bacterias indicadoras de contaminación fecal. Estas bacterias pueden ser utilizadas para valorar la calidad de los alimentos, sedimentos y aguas destinadas al consumo humano, la agricultura, la industria y la recreación. No existe un indicador universal, por lo que se debe seleccionar el más apropiado para la situación específica en estudio (Luby et al., 2008 y Bachoon et al., 2010).

Méndez et al., 2010 señalan que los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos en cuanto a concentración en las aguas y reacción frente a factores ambientales, pero son más fáciles, rápidos y económicos de identificar.

Una vez que se ha demostrado la presencia de estos grupos indicadores, se puede inferir que los microorganismos patógenos se encuentran presentes y su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes y tiempo de retención hídrica. Los indicadores de contaminación fecal más utilizados son los coliformes totales y termotolerantes, *Escherichia coli* y enterococos (Del Pilar et al., 2005 y Ávila de Navia & Estupiñam 2009).

Un microorganismo indicador de contaminación fecal debe cumplir algunos requisitos para ser considerado como un buen indicador: debe ser un constituyente normal de la microbiota intestinal de individuos sanos, estar presente de forma exclusiva en las heces de animales homeotermos y cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están, presentarse en número elevado, lo que facilita su aislamiento e identificación, debe ser incapaz de reproducirse fuera del tracto gastrointestinal del ser humano y de los animales homeotermos, su tiempo de supervivencia debe ser igual o superior al de las bacterias patógenas, su resistencia a los factores ambientales debe ser igual o superior al de los patógenos de origen fecal, debe ser fácil de aislar y cuantificar y no debe ser patógeno (Del Pilar et al., 2005 y Bohem et al., 2013).

Los organismos específicos que han sido empleados o propuestos como indicadores de la contaminación humana se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Los organismos específicos que han sido empleados o propuestos como indicadores de la contaminación humana

Organismo indicador	Característica
Bacterias coliformes	Especies de organismos que pueden fermentar lactosa con generación de gases (o producen una colonia diferenciable en un periodo de incubación en un medio adecuado de 24 ± 2 h a 48 ± 3 h) a $35 \pm 0,5$ °C. Existen algunas variedades que no se ajustan a la definición. El grupo de coliformes incluye cuatro géneros de la familia Enterobacteriácea. Estos son el <i>Escherichia</i> , <i>Klebisella</i> , <i>Citrobactor</i> y <i>Enterobacter</i> . Del grupo de organismos, el género <i>Escherichia</i> (especie <i>E. coli</i>) parece ser el más representativo de la contaminación fecal.
Bacterias coliformes fecales	Se estableció un grupo de bacterias coliformes fecales en función de la capacidad de generar gas (o colonias) a una temperatura de incubación de elevada ($44,5 \pm 0,2$ °C durante 24 ± 2 h).
<i>Klebisella</i>	La población total de coliformes incluye el género <i>Klebisella</i> . La <i>Klebisella</i> termotolerante también se incluye en el grupo de coliformes fecales. Este grupo se cultiva a $35 \pm 0,5$ °C durante 24 ± 2 h.
<i>Escherichia coli</i>	El <i>E. coli</i> es parte de la población bacteriana y es el género de coliformes más representativos de las fuentes de contaminación fecal.
Estreptococos fecales	Este grupo se ha empleado, junto con los coliformes fecales, para determinar las fuentes de contaminación fecal reciente (humana o de animales de granja). Con los procedimientos analíticos habituales no es posible diferenciar los verdaderos estreptococos fecales de algunas de las variedades que se parecen a este grupo, lo cual representa un impedimento para su uso como organismo indicador.
Enterococos	Dos familias de estreptococos fecales - <i>S. faecalis</i> y <i>s. faecium</i> son los miembros del grupo de los estreptococos más específicos de la contaminación humana. Las dos familias conocidas como enterococos se pueden aislar y cuantificar mediante la eliminación de las demás familias mediante métodos analíticos. Los enterococos suelen estar presentes en número inferior al resto de los organismos indicadores; no obstante, sobreviven mejor en agua salada.
<i>Clostridium perfringens</i>	Es una bacteria persistente anaerobia formadora de esporas, y sus características la convierten en un indicador útil en los casos en los que se realiza la desinfección del agua, en los que es posible la existencia pasada de contaminación, en los que el tiempo que se tarda antes de realizar los análisis es dilatado.
<i>P. aeruginosa</i> y <i>A. hydrophila</i>	Estos organismos pueden estar presentes en grandes cantidades en el agua residual. Ambos se pueden considerar como organismos acuáticos y se pueden encontrar en el agua en ausencia de fuentes de contaminación fecal inmediatas.

FUENTE: Adaptado de Feachem et al., 1983 y Mara, 1974

La composición de las aguas residuales se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales. Los constituyentes citados en la Tabla 3 son aquellos cuyo análisis se suele hacer de forma más o menos rutinaria.

Tabla 3: Composición típica del agua domestica bruta

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno: 5 días, 20°C (DBO₅, 20°C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno total (N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total (P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (CaCO₃)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	n.º/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µ g/l	<100	100-400	>400

FUENTE: Metcalf & Eddy, 1995

2.3 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores (Secretariado Alianza por el Agua, 2014).

2.3.1 Niveles de tratamiento para aguas residuales:

“El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente” (Ramalho, 1990). Los niveles de tratamiento se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4: Niveles de tratamiento

Nivel	Descripción	Tipo de unidad
Preliminar	Remueve material causantes de problemas operacionales como trapos, ramas y arenisca	Rejas, tamices, desarenador, tanques de homogenización, trampas de grasa
Primario	Remueve una porción de sólidos suspendidos y de materia orgánica.	Sedimentador, unidades con inyección de aire, tanque séptico, Imhoff
Secundario	Remueve materia orgánica biodegradable disuelta o suspendida.	Lodos activados, biodiscos, filtros percoladores, humedales, lagunas, reactor UASB
Terciario	Remueve sólidos suspendidos a través de microfiltración.	Microfiltración, la coagulación y precipitación, la adsorción por carbón activado, cloración
Avanzado	Remueve material remanente suspendido o disuelto, después de tratamiento biológico.	Destilación, osmosis, cloración, ozonización, intercambio iónico, nanofiltración, adsorción por carbón activado, electrodiálisis

FUENTE: Adaptado de Idelovitch y Ringslog, 1997; Metcalf y Eddy, 2003; Hernández *et al.*, 2000

El objetivo del tratamiento preliminar es solo la eliminación de sólidos gruesos, mientras que el tratamiento primario apunta a eliminar los sólidos sedimentables y parte de la materia orgánica. Los mecanismos de eliminación de contaminantes físicos son predominantes en ambos niveles. En el tratamiento secundario el objetivo es la eliminación de materia orgánica

y posiblemente nutrientes (nitrógeno y fósforo) por mecanismos predominantemente biológicos. El objetivo del tratamiento terciario es la eliminación de contaminantes específicos (generalmente compuestos tóxicos o no biodegradables) o la eliminación complementaria de contaminantes que no se eliminaron lo suficiente en el tratamiento secundario. El tratamiento terciario es raro en los países en desarrollo (Von Sperling & Chernicharo, 2005). En la Tabla 5 se nombran las características de los principales niveles de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 5: Características de los principales niveles de tratamiento de aguas residuales

ITEM	Nivel de tratamiento		
	Preliminar	Primario	Secundario
Contaminantes eliminados	Sólidos gruesos	Sólidos sedimentables y DBO	Sólidos no sedimentables, partículas finas, DBO, soluble DBO, Nutrientes y Patógenos
Eficiencias de remoción	-	SS: 60-70%, DBO: 25 - 40%, Coliformes: 30-40%	SS: 65-95%, DBO: 60-99%, Coliformes: 60-90%
Mecanismo de tratamiento predominante	Físico	Físico	Biológico
Cumple con los estándares de descarga habitual?	No	No	Usualmente si
Aplicación	Aguas arriba de la estación de bombeo, Etapa inicial de tratamiento	Tratamiento parcial, Etapa intermedia de un tratamiento más completo.	Tratamiento más completo (para materia orgánica)

FUENTE: Von Sperling y Chernicharo, 2005

2.3.2 Sistemas biológicos:

“La remoción de materia orgánica soluble puede llevarse a cabo a través de procesos biológicos aerobios o anaerobios. En ambos casos, los microorganismos utilizan la materia orgánica como fuente de energía y carbono, y generan nueva biomasa” (Díaz et al., 2002).

- **Tratamiento aeróbico:**

La presencia de O₂ hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua (Fernández et al., 2006).

- **Tratamiento anaeróbico:**

“En este caso el aceptor de electrones puede ser el CO₂ o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH₄” (Fernández et al., 2006).

En la mayoría de las situaciones, se ha utilizado un sistema de tratamiento combinado para obtener las ventajas sustanciales de la incorporación de un sistema anaeróbico como primera etapa, seguido de un sistema de post-tratamiento. En este sentido, varias alternativas de post-tratamiento han sido investigadas, informadas e implementadas en los últimos años, incluidos los sistemas aeróbicos y anaeróbicos. Prácticamente todos los procesos de tratamiento de aguas residuales crudas también son capaces de ofrecer tratamiento posterior para los efluentes que forman los reactores anaeróbicos (Von Sperling & Chernicharo, 2005).

Crites & Tchobanoglous (2000) indican que los procesos biológicos, aerobios o anaerobios, por si solos son insuficientes para la eliminación de microorganismos patógenos y nutrientes, excepto las lagunas de estabilización para el caso de los patógenos, esto posiciona la combinación de procesos como una herramienta a la hora de eliminar este tipo de constituyentes en las aguas residuales.

Quispe (2013) indica que, para “solucionar el problema de tratamiento del agua residual, existen procesos de tipo aerobio y anaerobio o procesos combinados anaerobio-aerobio”.

En la Tabla 6 se observan los principales procesos biológicos empleados.

Tabla 6 : Principales procesos de tratamiento biológico en aguas residuales

Tipo	Nombre común	Uso	Fundamentos del proceso	Eficiencias logradas
Procesos aerobios				
Crecimiento en suspensión	Lodos activados	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	En un reactor donde se mantiene una masa floclulenta en suspensión, de superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloides y suspendidos, constituida por microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos.	80-85% DBO y SST
	Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y de maduración)		En ellas se reduce la materia orgánica, los microorganismos patógenos que representan un grave problema para la salud y además su efluente puede ser reutilización, con finalidades como la agricultura.	80-90% y SST, además de N y P
Película bacterial adherida	Filtros percoladores		La materia orgánica que se halla presente en el AR es degradada por la población de microorganismos adherida al medio, en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios, a medida que los microorganismos crecen en el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar todo el espesor de la película.	80-85% DBO y SST
	Biodiscos		La película biológica se encuentra en rotación dentro del agua residual sedimentada y dentro de la atmósfera para proveer oxígeno a los microorganismos. El AR fluye en sentido paralelo o perpendicular al eje horizontal de rotación, al pasar de una etapa a otra o de un tanque a otro.	80-85% DBO y SST
Híbrido (combinación) crecimiento en suspensión y adherido	Humedales construidos (superficiales y subsuperficiales)		La materia orgánica y los nutrientes que transportan las AR, son degradadas por la población microbiana y asimilados por las plantas emergentes, sumergidas y flotantes con enraizamiento fijo, mientras que las libremente flotantes toman los nutrientes directamente del agua.	80-85% y SST, además de N y P
Procesos anaerobios				
Crecimiento en suspensión	Tanque séptico	Reducción de la DBO carbonácea, nitrificación	Se logran las fases de hidrólisis y acidogénesis del material orgánico, con la correspondiente retención de sólidos biodegradables durante más tiempo, que el material orgánico presente en forma disuelta o coloidal; generalmente se complementa con otro tratamiento buscando mejorar eficiencias de reducción.	40-50% DBO y SST
	Reactor UASB		Se basa en la acumulación de microorganismos en un reactor, cuyas características de sedimentación impidan su arrastre fuera del mismo; otras propiedades esenciales que reúne este tipo de reactor es disponer de un mecanismo de separación gas-líquido-sólido, por medio de campanas colectoras situadas en su parte alta, mediante la cual se consigue la sedimentación de los flóculos de pequeño tamaño que ascienden adherido a las burbujas de gas y el disponer de un sistema distribución uniforme del afluente en la base del reactor.	80-90% DBO y SST
	Laguna anaerobia		La estabilización en condiciones anaerobias es lenta, ya que las bacterias se reproducen a una baja tasa, es por esto que generan menos lodo que los proceso aerobios.	80-90% DBO y SST
Película bacterial adherida	Filtro anaerobio		En los filtros anaerobios de flujo ascendente la mayor parte de la biomasa bacteriana se acumula como flóculos, mientras que en los de flujo descendente, la biomasa esta así totalmente retenida en las paredes del reactor y el material de soporte.	60-80% DBO y SST

FUENTE: Crites y Tchobanoglous, 2000

2.4 Tanque Séptico:

El tanque séptico es la unidad que separa la parte sólida de las aguas servidas por un proceso de sedimentación simple, realizando en su interior un proceso séptico, que estabiliza la materia orgánica por acción de las bacterias anaeróbicas, convirtiéndola entonces en lodo inofensivo (Calvache et al., 2002).

Siendo un tratamiento primario, la USEPA (1993) indica que se pueden utilizar los tanques sépticos como un proceso de tratamiento precedente a los humedales artificiales.

La guía para el diseño de tanques sépticos de la OPS/CEPIS (2005) indica que el tanque séptico presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Apropiado para comunidades rurales, edificaciones, condominios, etc.
- Tiene un bajo costo de construcción y operación.
- Mínimo grado de dificultad en operación y mantenimiento si se cuenta con infraestructura de remoción de lodos.

Desventajas:

- De uso limitado para un máximo de 350 habitantes.
- También de uso limitado a la capacidad de infiltración del terreno que permita disponer adecuadamente los efluentes en el subsuelo.
- Requiere facilidades para la remoción de lodos (bombas, camiones con bombas de vacío, etc.).

2.4.1 Dimensiones de un tanque séptico:

Para determinar las dimensiones internas de un tanque séptico rectangular, el reglamento Nacional de Edificaciones incorpora la Norma IS. 0.20, que señala los siguientes criterios:

a) Profundidad máxima de espuma sumergida (H_e):

Se debe considerar un volumen de almacenamiento de natas y espumas, la profundidad máxima de espuma sumergida (H_e , en m) es una función del área superficial del tanque séptico (A , en m^2) y se calcula mediante la ecuación:

$$H_e = \frac{0.7}{A}$$

A: Área superficial del tanque séptico, en m^2 .

- b) Debe existir una profundidad mínima aceptable de la zona de sedimentación que se denomina profundidad de espacio libre (H_I , en m) y comprende la superficie libre de espuma sumergida y la profundidad libre de lodos.
- c) La profundidad libre de espuma sumergida es la distancia entre la superficie inferior de la capa de espuma y el nivel inferior de la Tee o cortina del dispositivo de salida del tanque séptico (H_{es}) y debe tener un valor mínimo de 0.1 m.
- d) La profundidad libre de lodos es la distancia entre la parte superior de la capa de lodo y el nivel inferior de la Tee o cortina del dispositivo de salida, su valor (H_o , en m) se relaciona con el área superficial del tanque séptico y se calcula mediante la fórmula:

$$H_o = 0,82 - 0,26xA$$

H_o , está sujeto a un valor mínimo de 0.3 m

- e) La profundidad de espacio libre (H_I) debe seleccionarse comparando la profundidad del espacio libre mínimo total calculado como $(0.1 + H_o)$ con la profundidad mínima requerida para la sedimentación (H_s), se elige la mayor profundidad.

$$H_s = \frac{V_s}{A}$$

Donde:

A = Área superficial del tanque séptico

V_s = Volumen de sedimentación

- f) La profundidad total efectiva es la suma de la profundidad de digestión y almacenamiento de lodos ($H_d = V_d / A$), la profundidad del espacio libre (H_I) y la profundidad máxima de las espumas sumergidas (H_e).

La profundidad total efectiva:

$$H_{total\ efectiva} = H_d + H_I + H_e$$

- g) En todo tanque séptico habrá una cámara de aire de por lo menos 0.3 m de altura libre entre el nivel superior de las natas espumas y la parte inferior de la losa de techo.
- h) Cuando en la aplicación de las fórmulas de diseño se obtenga un volumen menor a $3m^3$, la capacidad total mínima se considera en $3m^3$.

- i) Para mejorar la calidad de los efluentes, los tanques sépticos, podrán subdividirse en 2 o más cámaras. No obstante, se podrán aceptar tanques de una sola cámara cuando la capacidad total del tanque séptico no seas superior a los 5m³.
- j) Ningún tanque séptico se diseñará para un caudal superior a los 20 m³/día. Cuando el volumen de líquidos a tratar es un día superior a los 20 m³ se buscará otra solución. No se permitirá para estas condiciones el uso de tanques sépticos en paralelo.
- k) Cuando el tanque séptico tenga 2 o más cámaras, la primera tendrá una capacidad de por lo menos 50% de la capacidad útil total.
- l) La relación entre el largo y el ancho de un tanque séptico rectangular será como mínimo de 2:1.

Gráficamente estas dimensiones se muestran en la Figura 3.

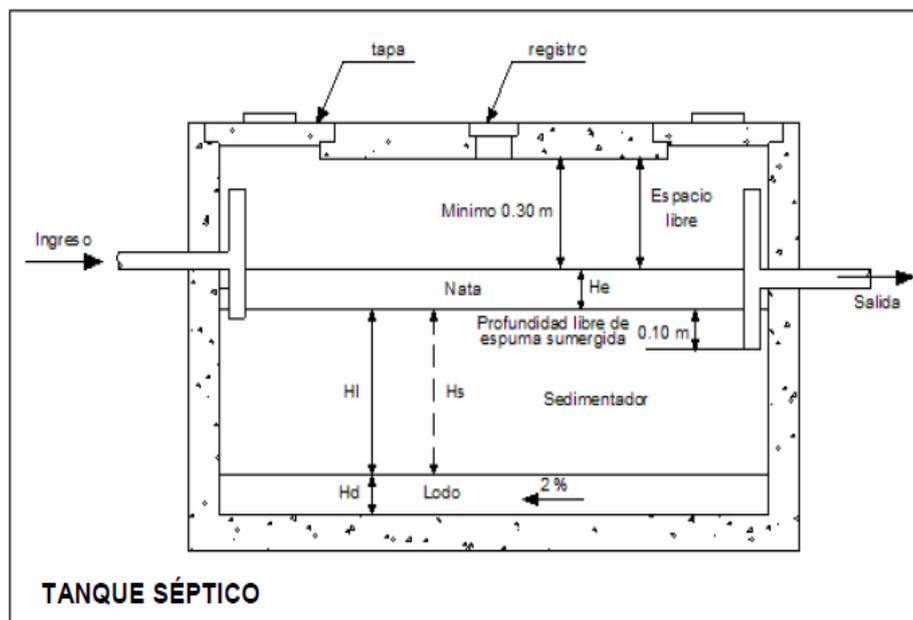


Figura 3: Dimensiones del tanque séptico

FUENTE: CEPIS, 2005

2.4.2 Operación y mantenimiento del tanque séptico:

Para la operación y mantenimiento del tanque séptico, la Norma IS. 0.20 del reglamento Nacional de Edificaciones, indica que:

- a) Para una adecuada operación del sistema, se recomienda no mezclar las aguas de lluvia con las aguas residuales; así mismo, se debe evitar el uso de químicos para limpieza del tanque séptico y el vertimiento de aceites.

Los tanques sépticos deben ser inspeccionados al menos una vez por año ya que ésta es la única manera de determinar cuándo se requiere una operación de mantenimiento y limpieza. Dicha inspección deberá limitarse a medir la profundidad de los lodos y de la nata. Los lodos se extraerán cuando los sólidos llegan a la mitad o a las dos terceras partes de la distancia total entre el nivel del líquido y el fondo.

- b) La limpieza se efectúa bombeando el contenido del tanque a un camión cisterna. Si no se dispone de un camión cisterna aspirador, los lodos deben sacarse manualmente con cubetas o baldes. Es este un trabajo desagradable, que pone en peligro la salud de los que lo realizan.
- c) Cuando la topografía del terreno lo permita se puede colocar una tubería de drenaje de lodos, que se colocara en la parte más profunda del tanque (zona de ingreso). La tubería estará provista de una válvula. En este caso, es recomendable que la evacuación de lodos se realice hacia un lecho de secado.
- d) Cuando se extraen los lodos de un tanque séptico, este no debe lavarse completamente ni desinfectarse. Se debe dejar en el tanque séptico una pequeña cantidad de lodo para asegurar que el proceso de digestión continúe con rapidez.
- e) Los lodos retirados de los tanques sépticos pueden transportarse hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales. En zonas donde no exista fácil acceso a las plantas de tratamiento o estas no existan en lugares cercanos, se debe disponer de lodos en trincheras y una vez secos proceder a enterrarlos o usarlos como mejorador de suelo. Las zonas de enterramiento deben estar alejadas de las viviendas (por lo menos 500 metros de la vivienda más cercana).

El efluente de un tanque séptico no posee las cualidades físico-químicos u organolépticas adecuadas para ser descargado directamente a un cuerpo receptor de agua. Por esta razón es necesario dar un tratamiento complementario al efluente con el proceso de disminuir los riesgos de contaminación y de salud pública (Norma IS. 0.20, 2006).

2.4.3 Procesos dentro del tanque séptico:

EL Centro de Información de Sanidad Ambiental del Instituto Asiático de Tecnología (1982) indica que, aunque un tanque séptico es simplemente una cuenca de sedimentación sin partes móviles o químicos añadidos, los procesos que ocurren en el tanque son complejos, e interactúan entre sí. Los procesos más importantes se discuten a continuación:

a) Separación de sólidos suspendidos:

Este es un proceso puramente mecánico y resulta en la formación de tres capas distintas en el tanque séptico: una capa de lodo en la parte inferior, una capa flotante de espuma en la parte superior y una capa relativamente clara de licor en el medio. Partículas muy finas llamados coloides inicialmente permanecen en suspensión, pero luego estas partículas se coagulan para formar partículas más grandes que pueden caer o elevarse dependiendo de su densidad. La coagulación es asistida por gases y partículas de lodo digerido que se elevan a través del líquido.

b) Digestión de lodos y espuma:

La materia orgánica en el lodo, así como en la espuma, se degrada por las bacterias anaerobias como resultado de la acción bacteriana, los ácidos volátiles se forman al principio y, finalmente, se convierten principalmente en agua, dióxido de carbono y metano. La formación de gases en la capa de lodos provoca la flotación irregular de los flujos de lodos, que se vuelven a asentar después de la liberación de los gases en la superficie. Lodos en el fondo del tanque se compactan, volviéndose más densos debido al peso del líquido y las capas superiores de lodos.

c) Estabilización del líquido:

Durante su retención en el tanque, quedan materiales orgánicos en el líquido que son estabilizados por bacterias anaerobias, que descomponen sustancias complejas en sustancias más simples, en un proceso similar al descrito en la digestión de lodos y espuma.

d) Crecimiento de microorganismos:

Muchos tipos de microorganismos crecen, se reproducen y mueren en el tanque. La mayoría están adheridos a la materia orgánica y por lo tanto separada con los sólidos. Algunos, acostumbrados a vivir en el intestino humano, sufren en el entorno adverso del tanque. Algunos son pesados y se hunden hasta la capa de lodos. Hay una reducción global en el número de microorganismos, pero una gran cantidad de virus, bacterias, protozoos y los helmintos pueden estar presentes en el efluente, el lodo y la espuma.

La calidad del efluente de las fosas sépticas domiciliarias es difícil de determinar. Los problemas asociados con la obtención de análisis estadísticos significativos en la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Sólidos suspendidos (SS) en un sistema que sufre grandes variaciones diurnas en el flujo de entrada con súbitos

aumentos en la concentración de sólidos suspendidos y dependiendo en parte del sistema de digestión la cual es sensible a las fluctuaciones de temperatura diaria, son enormes. Algunos autores sugieren que la reducción promedio de DBO₅ y SS están dentro de los rangos del 30 al 50 % y del 50 al 70 %. Si los resultados después del primer año de operación no están dentro de este estándar, se debe hacer una revisión de la operación del sistema (Barnes et al, 1978).

2.5 Humedales Artificiales:

Lara & Vera (2005) indican que los humedales artificiales son tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que consisten en lechos poco profundos (normalmente menores de 1 m. de profundidad), pozos o canales que se han sembrado con plantas acuáticas, y que dependen de procesos naturales, de tipo biológico, físico y químico, para tratar el agua residual.

2.5.1 Tipos de Humedales Artificiales:

a) Humedales de flujo libre superficial:

USEPA (2000) define como humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS, *free water Surface wetlands*) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas FLS entre los que se incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrófitas emergentes). Un humedal artificial de flujo subsuperficial (FS, *subsurface flow wetlands*) 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.

b) Humedales de flujo subsuperficial:

Los humedales de flujo subsuperficial se caracterizan porque la circulación del agua dentro del sistema se lleva a cabo a través de un medio granular, en donde están en contacto con las raíces de las plantas. Los humedales se clasifican en función de la aplicación del agua al sistema, como humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo et al., 2010).

- **Humedales de flujo subsuperficial horizontal:**

En estos sistemas el agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra, trasiega en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno y entre las raíces de las plantas. Al final y en el fondo del lecho, el agua tratada se recoge se evacua por medio de tuberías y/o vertederos (Arias & Brix, 2003).

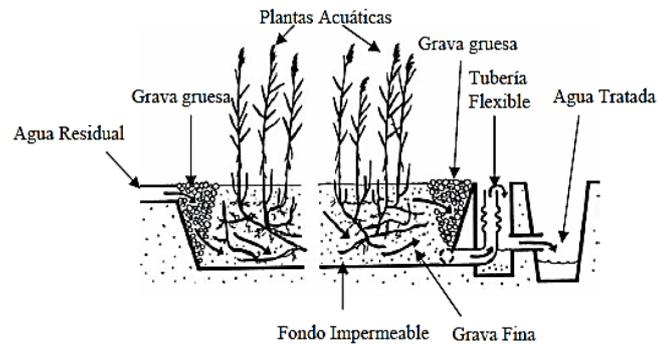


Figura 4 : Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal

FUENTE: FUENTE: Adaptado de Arias & Brix, 2003

- **Humedal de flujo subsuperficial vertical:**

El agua fluye de manera descendente y percola en el humedal. El agua se vierte y se distribuye en toda la superficie del lecho, entre las diferentes capas del material filtrante, para poder tratarla uniformemente. Una vez el agua pasa a través del lecho, se recoge en el fondo y se evacua por medio de tubería. El agua en los humedales de flujo vertical se puede dosificar de manera continua o intermitente hasta inundar totalmente el lecho, siempre dependiendo del modo de operación previsto en el diseño (Arias & Brix, 2003).

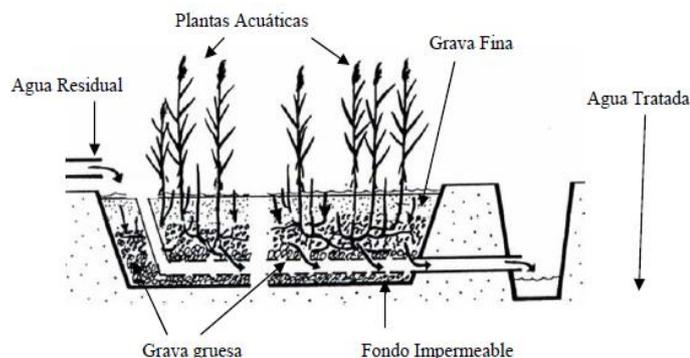


Figura 5: Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical

FUENTE: Adaptado de Arias & Brix, 2003

2.5.2 Componentes de los humedales artificiales:

Rubio & Páez (2009) mencionan que un humedal contiene agua, vegetación, medio filtrante y microorganismos, además de condiciones ambientales como luz solar y temperatura. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y en su recolección.

a) El Agua:

Una de las características fundamentales de los humedales es el nivel del agua y su fluctuación en el tiempo, ya que es un componente importante para mantener la estructura y funcionamiento. Las condiciones hidrológicas afectan a un gran número de factores bióticos y abióticos lo que conlleva la producción de anaerobiosis del suelo alterando la disponibilidad de nutrientes y en los humedales costeros modifica la salinidad. (Moreno-Casasola & Warner, 2009).

b) Substratos, sedimentos y restos de vegetación:

Lara (1999) indica que los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. Los sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas, y también son importantes por las siguientes 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.

c) Vegetación:

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces y rizomas) permiten la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales de flujo

superficial es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan, y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirve como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte de tratamiento que ocurre (Lara, 1999).

d) Microorganismos y organismos inferiores heterótrofos:

Los organismos heterótrofos tienen funciones indispensables para la depuración del agua residual, como: bacterias, protozoos, actinomicetos, hongos. Aunque son grupos de organismos muy diferentes, coinciden en ser organismos que participan en la descomposición de materia orgánica y a la vez, son productores primarios de biomasa. Se desarrollan naturalmente en los humedales artificiales, concentrándose alrededor de la superficie de partículas sólidas, sedimentos, y de desechos y partes sumergidas de las plantas (Fernández, 2004).

2.5.3 Tipos de plantas en los humedales:

Fernández (2004) indica que las plantas que naturalmente se desarrollan en el humedal se pueden localizar en cualquiera de esas áreas, ya sea la acuática o la de saturación de agua. Las peculiaridades ambientales determinan que las plantas que viven allí, hayan desarrollado adaptaciones específicas a las condiciones del humedal.

Estos autores clasifican las plantas basándose por la forma de fijación:

- **Plantas de libre flotación:**

Sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes. Ejemplos: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y lenteja de agua (*Lemna spp.* y *Salvinia minima*) (Núñez et al., 2004).

- **Plantas sumergidas:**

Se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emerger o quedar por encima de la superficie de agua. Ejemplos: bejuquillo (*Ceratophyllum demersum*), hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y pastos (*Phyllospadix torreyi*) (Núñez et al., 2004).

- **Plantas emergentes:**

La raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie de agua. Sus estructuras reproductoras están en la porción

aérea de la planta. Ejemplos: carrizo (*Phragmites communis*), platanillo (*Sagitaria latifolia*) y tule (*Thypha dominguensis*) (Núñez et al., 2004).

Estudios como el de Zurita et al., (2011) han demostrado “sustituir macrófitas convencionales por plantas ornamentales con un valor comercial de sus flores, como son *Zantedeschia aethiopica*, *Canna spp.* e *Iris spp.*”

“Las plantas ornamentales pueden mejorar la estética del humedal, otorgando beneficios económicos a través de la producción de flores, para su comercialización, este beneficio permitiría recuperar parte de los recursos invertidos en la construcción y mantenimiento del sistema” (Belmont et al., 2004).

2.5.4 Experiencias con la planta ornamental *Zantedeschia aethiopica*, utilizada en humedales construidos:

- **Figuroa (1999)** evaluó el tratamiento de las aguas residuales procedente del aseo de animales e instalaciones de una pequeña granja porcícola en dos humedales horizontales de flujo subsuperficial, en uno sembró al alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) como plantas emergentes y en el otro no se sembró ninguna planta. Se construyó un estanque anaerobio como un pre-tratamiento seguido de los humedales que tuvieron dimensiones de 2.90 m de largo, 1.18 m de ancho y 1.0 m. El tiempo de residencia hidráulico en ambos humedales fue de 2.5 días, con un caudal de entrada de 173 l/día cada uno. El estudio concluyó que el humedal con la especie *Zantedeschia aethiopica* como planta emergente, tuvo una mayor efectividad en el tratamiento de las aguas residuales porcícolas en relación con un humedal con las mismas características, pero sin plantas emergentes”. En la Tabla 7 se pueden observar los valores promedios obtenidos durante la investigación.

Tabla 7 : Valores promedios obtenidos durante la investigación

Parámetro	Afluente del humedal	Efluente del humedal sin planta	% de Remoción del humedal sin plantas	Efluente del humedal sembrado con calas	% de Remoción del humedal sembrado con calas
DQO (mg/l)	1152.52	513.84	55	367.65	68
DBO5 (mg/l)	566.57	265.37	53	191.02	66
Fosfatos como PO4 (mg/l)	30.1	16.47	45.28	11.15	62.95
N-NH3 (mg/l)	60.22	46.42	22.92	40.03	33.52
SST (mg/l)	159.79	70.74	55.73	55.37	65.35
Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)	1305.96	1197.33	8.32	1128.13	13.62
Turbiedad (UTN)	98.35	41.33	57.97	30.49	68.99
Color (U. Pt-Co)	87	80	8.05	79	9.2
Sulfatos como SO4 (mg/l)	32.02	19.39	58.19	10.43	67.44
Coliformes totales (NMP/100ml)	7.29E+08	9.41E+06	98.71	5.49E+05	99.92
Coliformes fecales (NMP/100ml)	6.00E+08	9.22E+06	98.46	4.92E+05	99.92

FUENTE: Figueroa, 1999

- Zurita et al., (2006)** realizaron experimentos a escala de laboratorio en celdas, simulando un sistema de humedales de flujo subsuperficial construidos, incluyendo un tratamiento previo que consiste en la sedimentación de sólidos en la entrada del sistema. El flujo de aguas residuales fue mantenido entre 3.5 y 5.5 mL min⁻¹ para mantener un tiempo medio de retención de 4 días en cada una de las células en la entrada del sistema. Las especies ornamentales estudiadas en los humedales fueron *Zantedeschia aethiopica* (Cala), *Strelitzia reginae* (Ave del paraíso), *Anthurium andraeanum* (Flor de flamenco), *Agapanthus africanus* (Agapanto) y *Hemmerocallis dumortieri* (Lirio de día). La eliminación de materia orgánica (DBO₅) y nutrientes (NT y PT) fue superior al 70%, excepto la celda plantado con *Anthurium andraeanum*. En las especies *Z. aethiopica* y *C. hybrids* mostraron una mejor tasa de crecimiento respecto de las otras tres especies. El estudio demostró que el uso de las plantas ornamentales en humedales de flujo subsuperficial fue efectivo para la eliminación de contaminantes, así como la posibilidad de producir flores en este tipo de sistemas. En la Tabla 8 se muestra los porcentajes de eliminación de contaminantes de las plantas ornamentales en el estudio.

Tabla 8: Porcentaje de eliminación de contaminantes para (a) el período completo del estudio, y (b) solo para los últimos dos meses del estudio

Parámetros	Célula 1 <i>Strelitzia reginae</i> %	Célula 2 <i>Zantedeschia aethiopica</i> %	Célula 3 <i>Canna hybrids</i> %	Célula 4 <i>Anthurium andreanum</i> %	Célula 5 <i>Hemerocallis dumortieri</i> %
a) Septiembre del 2004 a Enero del 2005 (n = 16)					
DBO	75.8+3.1	77.7+3.4	77.6+3.7	67.0+3.9	71.3+3.7
DQO	79.8+1.4	83.2+1.4	78.5+2.2	77.4+1.7	79.2+1.7
Nitrato	71.6+4.5	79.1+2.6	79.0+3.6	67.8+5.3	64.4+5.3
Amonio	63.6+5.1	70.8+2.9	70.1+2.2	64.6+3.3	68.6+2.6
Nitrógeno Orgánico	75.0+3.5	79.8+2.5	78.6+3.6	69.0+4.9	72.7+4.4
Nitrógeno total	71.2+3.8	77.9+2.5	77.1+3.3	66.4+4.9	71.7+3.9
Fósforo Total	66.5+3.2	78.1+3.0	74.3+2.2	66.6+4.0	66.2+4.5
Sólidos suspendidos totales	100 ^b	100 ^b	100 ^b	100 ^b	100 ^b
Coliformes totales	99.88+0.03	99.96+0.02	99.98+0.001	99.79+0.09	99.95+0.02
Coliformes fecales	99.84+0.05	99.92+0.04	99.96+0.002	99.35+0.30	99.94+0.04
b) Noviembre 26 del 2004 a Enero 21 del 2005 (n = 6)					
DBO	85.0+1.4	84.1+2.2	86.6+2.8	82.3+1.1	84.1+1.1
DQO	82.7+1.4	86.6+1.3	85.7+1.9	78.5+1.9	85.5+1.8
Nitrato	85.9+0.8	86.9+0.8	87.3+1.0	84.6+1.5	84.0+1.5
Amonio	77.5+1.7	77.0+2.9	76.3+2.9	76.3+2.9	77.4+1.6
Nitrógeno Orgánico	88.0+1.2	88.2+1.5	85.4+2.9	85.4+2.9	87.5+1.0
Nitrógeno total	85.6+1.0	86.0+1.3	85.2+1.4	85.2+1.4	84.3+0.9
Fósforo Total	78.5+1.7	80.2+1.8	81.2+1.4	81.2+1.4	79.9+2.0

^a Intervalo de confianza promedio de $\pm 95\%$

^b Toda la concentración de salida medida donde $<1 \text{ mg L}^{-1}$

FUENTE: Zurita et al., 2006

- **Zurita et al., (2008)** evaluaron el estado físico de la planta *Zantedeschia aethiopica* bajo diferentes patrones en humedales de flujo vertical y horizontal, utilizando fluorescencia inducida por láser y determinaron el mejor régimen de flujo para el mejor desarrollo de la planta.

Los resultados de las medidas físicas de las plantas, mostraron que la cala es una planta que puede ser utilizada como una planta emergente en los humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. El desarrollo de la cala fue más vigoroso, sin estrés bajo las condiciones de inundación continua en el humedal de flujo horizontal, en comparación con el flujo intermitente en el humedal de flujo vertical porque es una especie que posee mecanismos de adaptación al

anegamiento. Las plantas presentaron estrés en el cambio de las condiciones ambientales (cambio de temporada) durante el estudio porque el experimento no se llevó a cabo en un ambiente controlado. Estos cambios afectaron principalmente la vitalidad de las plantas en el humedal vertical.

La concentración de contaminantes de las aguas residuales domésticas en los humedales de tratamiento de flujo subsuperficial se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: La concentración de contaminantes de las aguas residuales domésticas en los humedales de tratamiento de flujo subsuperficial

Parámetro	Afluente	Humedal de flujo horizontal	Humedal de flujo vertical
DBO (mg/l)	115.5+15.6	24.3+3.7	21.8+6.2
DQO (mg/l)	247.5+32.4	51.7+5.3	56.4+15.4
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	57.5+12.7	11.4+5.1	22.4+5.4
Nitrógeno orgánico (mg/l)	4.1+1.0	2.1+0.6	1.8+0.5
Amonio (mg/l)	15.7+0.8	8.3+1.6	4.2+1.0
Nitrato (mg/l)	9.3+0.9	4.3+0.6	9.0+1.2
Nitrógeno total (mg/l)	28.7+1.3	13.1+1.9	14.8+1.5
Fósforo Total	8.3+1.2	4.2+0.4	3.9+0.5
Coliformes totales x103 (NMP/100ml)	4700+1800	194+85	68+31
Temperatura (°C)	21.1+0.5	18.9+0.5	18.9+0.5
pH	7.4+0.07	7.7+0.004	7.9+0.04
OD (mg/l)	0.0+0.0	0.4+0.2	2.4+0.2

Intervalo de confianza promedio de $\pm 95\%$

FUENTE: Zurita et al., 2008

- **Cala (*Zantedeschia aethiopica*):**

La Cala (*Zantedeschia aethiopica*) es originaria de zonas templadas frías, ubicadas al sureste de África. En las montañas de Kenia es común observar en campos como crecen de forma silvestre. Algunas investigaciones mencionan que también es originario de Asia y Sudamérica, donde la planta se adapta a las condiciones climáticas del sitio (Hernández, 2013).

Taxonomía y Morfología

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Subclase: Monocotiledóneae

Orden: Spadiciflorae

Familia: Araceae

Tribu: Zantedeschieae

Género: Zantedeschia

Especie: *Z. aethiopica*

Nombre Científico: *Zantedeschia aethiopica*

Nombre Común: Callas, Cartucho blanco.

a) Descripción Botánica

Es una planta herbácea perenne (Araceae), provista de rizomas de las que salen hojas y pedúnculos florales. Las hojas son en forma de flecha, carnosas de color verde brillante y sostenidas mediante un pecíolo con el doble de longitud que la hoja misma; las flores son agradablemente perfumadas, formando un espádice amarillo rodeado de la característica espata blanca; el pedúnculo floral es largo (Cruz-Castillo & Alfaro, 1997 y Cruz et al., 2008). Se cultiva como ornamental por sus vistosas flores de color blanco, alcanza hasta 150 cm de altura, produce dos o tres flores por cada bulbo; las inflorescencias son simples, de 4 a 7 cm de alto, con un cáliz en forma de embudo y un espádice erecto. Son monoicas y necesitan mucha agua cuando están floreciendo y poca tras acabar la floración. Para acelerar el ciclo productivo, la flor debe cortarse antes de producir semilla, posibilitando así que florezca nuevamente en el año (Dole & Wilkins, 1999).

“La raíz de las calas de color o cartucho se caracteriza por ser un órgano subterráneo, denominado bulbo o rizoma este almacena nutrientes necesarios para el crecimiento de la planta, por lo que necesita de profundidad para fijarse a la tierra cerca de 10 o 15 cm. La raíz es un sistema radicular fasciculado, la principal raíz deja de crecer muy pronto quedando el sistema radicular formado por numerosas raíces blancas delgadas y gruesas que nacen en la parte superior del bulbo, de la base del tallo” (Pato et al., s.f.).



Figura 6: Planta ornamental *Zantedeschia Aethiopica*

b) Requerimientos climáticos:

Se adapta a alturas entre los 600 y 3100 m.s.n.m. las condiciones óptimas se encuentran a temperaturas diurnas entre los 12 y 23 °C, siendo muy susceptibles a las temperaturas extremas. La temperatura del suelo para que haya una adecuada germinación, debe estar alrededor de los 15°C; temperaturas del suelo por encima de los 23 °C, incrementan la susceptibilidad de los bulbos al ataque de *Erwinia carotovora*, a medida que la temperatura disminuye, el crecimiento es más lento y el ciclo de cultivo puede aumentarse hasta en cinco semanas, las plantas son más altas, menos compactas y el color de las espatas más intenso. Por el contrario, al incrementarse la temperatura, el ciclo es más rápido, las plantas más exuberantes, menos compactas, los tallos más cortos y los colores más pálidos. En condiciones cálidas el desarrollo es escaso, la planta sufre desordenes fisiológicos y es atacada por bacteriosis, lo que no permite su establecimiento. Con temperaturas inferiores a los 8 °C, se induce a la dormancia de los bulbos, los cuales no germinan o permanecen en estado vegetativo (Pizano, 1999).

c) Sustrato de siembra:

Los sustratos de siembra aluden a un análisis de suelos para determinar la capacidad del suelo en cuanto a nutrientes para la planta. Mientras que el sustrato es el cultivo de plantas en preparaciones tanto de materiales orgánicos como inertes, destinados a dar soporte a la planta mas no proveer de nutrientes a la misma. Deben utilizarse sustratos bien drenados, con una porosidad entre el 40 y 60%, pH cercano a 6 y bajos contenidos de materia orgánica a fin de reducir los riesgos de bacteriosis. La Conductividad eléctrica debe ser menor de 1,5 dS/m (Pizano, 1999).

En sustratos pesados y con altos contenidos de materia orgánica el establecimiento de los bulbos resulta imposible, ya que las condiciones de alta humedad favorecen la incidencia y ataque de *Erwinia carotovora*, principal problema fitosanitario del cultivo. Por ello, los cultivos comerciales se realizan sobre camas levantadas con sustratos porosos (Gómez, 2009).

d) Enfermedades y plagas:

Guaqueta Trading (2015) indica que existen diferentes enfermedades y plagas que afectan al cultivo de la cala, y describen las enfermedades bacterianas y fungosas más importantes, como:

- Una de las bacterias que afectan el cultivo de la cala es *Erwinia carotovora*, la cual ataca principalmente al rizoma. Se trata de una bacteria que penetra en la planta esencialmente a través de heridas y produce una podredumbre blanda, acuosa y mal oliente. Esta enfermedad se produce durante el crecimiento de las plantas generalmente la planta se vuelve susceptible cuando se presenta un ataque previo de un hongo patógeno, acompañado por altas temperaturas del suelo (> 23°C). Para prevenir se debe evitar el ataque primario del hongo, buena higiene, usar agua limpia utilizar bulbos sanos y bien desinfectados, el empleo de sustrato con excelente drenaje y aireación a la vez que se encuentre limpio eliminar totalmente las plantas enfermas y emplear algún bactericida.
- Otra de las enfermedades importantes son los hongos patógenos que incluyen *Pythium*, *Fusarium* y *Rhizoctinia*, todos ellos atacan la raíz, los síntomas se presentan hasta 2 semanas después de la infección, hojas marchitas, amarillas, entorchadas son signo casi seguro del problema. Si estos problemas se descuidan la aparición de la bacteria *Erwinia* es casi inevitable, para su control un drench regular de amplio espectro, aplicado cada 2 a 4 semanas desde la siembra, puede ser indispensable. Se

usan distintos fungicidas permitidos. Los patógenos pueden ser 20 transportados en el agua a través de la irrigación o en el terreno. Revise la fuente de agua y si encuentra contaminación trátela adecuadamente.

- Entre las plagas más comunes que atacan las calas se mencionan los thrips y los áfidos, que deben ser controlados estos son vectores de otras enfermedades como el Virus del Mosaico Dasheen.

2.5.5 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales:

“Para determinar las características del agua residual tratada, se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de tratamiento requerido” (Romero, 1999).

a) Remoción de sólidos suspendidos:

La materia en suspensión queda retenida en los humedales mediante la combinación de diferentes fenómenos de tipo físico que en su conjunto se denominan “filtración del medio granular”. Entre estos fenómenos cabe destacar la sedimentación debida a la baja velocidad de circulación del agua y el tamizado que sucede a nivel de los espacios intersticiales del medio granular. Estos fenómenos se ven potenciados por las fuerzas de adhesión que ocurren entre los sólidos y que tienden a promover la formación de partículas de mayor tamaño (García & Corzo, 2008).

“La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los sistemas de humedales, se estima que gran parte de la retención ocurre entre el 12 y el 20% de la zona inicial del área total del humedal” (Lara, 1999).

b) Remoción de Materia orgánica:

Brix & Kolb (1998) citado en Delgadillo et al., (2010), mencionan que la remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos.

c) Remoción de nitrógeno:

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de amonio y también como nitrógeno orgánico. No suele ser habitual encontrar concentraciones significativas de nitratos y nitritos. En los humedales el principal mecanismo de eliminación

de nitrógeno es de tipo microbiano y consiste en la nitrificación seguida de la desnitrificación. Sin embargo, también hay otros procesos que contribuyen a la eliminación como la adsorción del amonio y la asimilación realizada por las plantas. En los humedales el ciclo del nitrógeno está acoplado al del carbono (materia orgánica) fundamentalmente a través de la desnitrificación (García & Corzo, 2008).

– **Amonificación:**

“La amonificación consiste en la conversión de Nitrógeno orgánico a amonio a través de actividad extracelular de enzimas excretadas por microorganismos” (Vyzmazal, 2007).

– **Nitrificación:**

La nitrificación es la oxidación de amonio a nitrato facilitada por un consorcio de microbios autótrofos, con nitrito como un producto intermedio importante. Para que el proceso tome lugar, los microorganismos, el oxígeno, la alcalinidad y los micronutrientes deben estar presente en las aguas residuales. Los nitrificadores autótrofos suelen tener un crecimiento más lento que los microorganismos heterótrofos aeróbicos y, por lo tanto, pueden ser superados en la presencia de materia orgánica fácilmente biodegradable. Una gran ventaja de humedales verticales es su alta capacidad de oxigenación y, por lo tanto, su capacidad para nitrificar. La nitrificación puede ocurrir en los sistemas de alta frecuencia, especialmente cuando se carga ligeramente con compuestos orgánicos. La nitrificación es a menudo un paso limitante para la eliminación de nitrógeno en los sistemas de humedales horizontales. La nitrificación sola es un proceso de conversión y no produce la eliminación de nitrógeno, a menos que esté adecuadamente acoplado a la desnitrificación (Günter et al., 2017).

– **Desnitrificación:**

La desnitrificación se discutió como un mecanismo de eliminación de carbono orgánico, pero es vital para eliminación efectiva de nitrógeno ya que convierte el nitrato en nitrógeno que se libera a la atmósfera. La desnitrificación es a menudo difícil de lograr en el tratamiento secundario humedales, y la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en general, debido a la nitrificación. El proceso suele ser un requisito previo para convertir el amoníaco influyente en nitrato, que no puede tener lugar hasta que se consuma suficiente carbono orgánico. Esto puede resultar insuficiente a la materia orgánica residual para la desnitrificación. El alto potencial de oxigenación de los sistemas de humedal vertical los hace deficientes en la desnitrificación, ya que el proceso requiere anoxia para que finalice

en gas nitrógeno. La mayoría de los sistemas de humedales horizontales desnitrificarán todo el nitrato que se puede crear dentro que se utiliza para el tratamiento secundario, mientras que la desnitrificación es más común en los sistemas terciarios. Por lo tanto, los humedales verticales típicos pueden eliminar poco TN pero tienen altas concentraciones de nitrato en el efluente. Humedales de alta frecuencia puede eliminar la TN hasta cierto punto, pero el efluente aún puede contener altas concentraciones de nitrógeno amonio. Factores ambientales que se sabe influyen en las tasas de desnitrificación incluyen el nivel de oxígeno disuelto (OD), pH, potencial redox, tipo de medio y la concentración de materia orgánica, entre otros (Günter et al., 2017).

d) Remoción de fósforo:

El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutrimento limitante de la productividad primaria. En concentraciones elevadas por la incorporación de aguas residuales o tratadas, estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutroficación (APHA, 1992).

Mecanismos que intervienen en la eliminación del fósforo en los humedales de tratamiento se incluyen precipitación química, sedimentación, sorción, absorción vegetal y microbiana. Desafortunadamente, la mayoría de estos procesos son lentos o no activo a menos que se usen medios especiales para mejorar los procesos abióticos. Como con el nitrógeno, las plantas incorporan fósforo en su biomasa, pero esto puede ser un mecanismo de remoción solo si las plantas se cosechan y, por lo tanto, están sujetas a las mismas limitaciones que captación de la planta de nitrógeno como mecanismo de eliminación (Gunter et al., 2005).

La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz, debido al limitado tiempo de retención hidráulica (TRH), por ende, el contacto entre el agua residual y el terreno también (Lara, 1999).

e) Remoción de patógenos:

La remoción de microorganismos, incluyendo bacterias patógenas, virus y helmintos, se efectúa por filtración en el suelo, adsorción, desecación, radiación, predación y exposición a otras condiciones ambientales adversas. Debido a su gran tamaño los helmintos y protozoos se remueven en la superficie del suelo mediante filtración. Las bacterias se

remueven del agua residual por filtración y adsorción, alcanzando valores habituales de remoción de 99.9% o más. La remoción de virus se presenta principalmente por adsorción (Crites & Tchobanoglous, 2000).

La eliminación de patógenos en los tratamientos de humedales es extremadamente compleja debido a la variedad de procesos que puede llevar a la eliminación o inactivación de bacterias, virus, protozoos o parásitos. La tecnología de tratamiento de humedales ofrece una combinación adecuada de física, química y mecanismos biológicos requeridos para eliminar los organismos patógenos. Los factores físicos incluyen la filtración y la sedimentación, y los factores químicos incluyen oxidación y adsorción a la materia orgánica. Los mecanismos de eliminación biológica incluyen la liberación de oxígeno y la actividad bacteriana en la zona de la raíz (rizosfera), así como agregación y retención en biopelículas, muerte natural, depredación y competencia para limitar nutrientes u oligoelementos. La mayoría de los datos disponibles sobre la capacidad de los humedales de tratamiento para eliminar los patógenos se centran en los organismos indicadores fecales; esta información está disponible para bacterias específicas, virus, ooquistes de protozoos y otros parásitos como huevos de helmintos. La eliminación de organismos indicadores en los humedales de tratamiento depende del tipo del sistema de humedales, las condiciones operativas y las características de los influentes de las aguas residuales. En general, se acepta que los humedales de tratamiento de subsuelo convencionales los diseños pueden eliminar hasta 3 unidades de log₁₀ de indicadores de bacterias fecales (Günter et al., 2017).

Tabla 10: Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA: sistemas de plantas acuáticas, HFS: humedales de flujo superficial, HFSS: humedales de flujo subsuperficial y HFV: humedales con flujo vertical

Contaminantes	SPA	HFS	HFSS	HFV
Materia orgánica	Conversión biológica por intervención de las bacterias aerobias, facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y de los detritos	Reducción de DBO solubles por conversión biológica por efectos de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en las superficies de las plantas y sobre los detritos. La DBO particulada se elimina por adsorción, filtración y por sedimentación	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a las superficies de las plantas y los detritos del medio del relleno del humedal	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y detritos
Materia en suspensión	Sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración
Nitrógeno	Proceso de nitrificación/desnitrificación	Procesos de nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización	Proceso de nitrificación/desnitrificación, asimilación por plantas y volatilización	Proceso de nitrificación/desnitrificación, asimilación por plantas y volatilización
Fósforo	Reducción por precipitación, por asimilación por plantas y microorganismos	Reducción por sedimentación, por asimilación por medio de las plantas y microorganismos	Reducción por filtración, absorción, por asimilación por parte de las plantas y microorganismos	Reducción por filtración, absorción, por asimilación por las plantas
Metales pesados	Sedimentación, por absorción y absorción por plantas. Volatilización, absorción y biodegradación	Absorción de plantas, superficie de detritos y por sedimentación	Absorción a las raíces de las plantas y los detritos y por sedimentación	Absorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Traza de contaminantes orgánicos	Volatilización, absorción y biodegradación	Volatilización, absorción y biodegradación	Absorción y biodegradación	Volatilización, absorción y biodegradación
Patógenos	Muerte natural, radiación U.V., depredación por otros organismos	Muerte natural, depredación, radiación U.V., sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas	Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas

FUENTE: Adaptado de Crites & Tchobanoglous, 1998

Tabla 11: Eficiencias típicas de eliminación de los principales tipos de humedales de tratamiento

Parámetros	HF	VF	French VF	FWS
Tipo de tratamiento	Secundario	Secundario	Combinados secundario y primario	terciario
Sólidos suspendidos totales	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Materia orgánica	> 80%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno Amoniacal	20-30%	> 90%	> 90%	> 80%
Nitrógeno total	30-50%	< 20%	< 20%	30-50%
Fósforo total	10-20%	10-20%	10-20%	10-20%
Coliformes	2log ₁₀	2-4log ₁₀	1-3log ₁₀	1log ₁₀

FUENTE: Günter et al., 2017

2.6 Marco legal del Tratamiento de Aguas Residuales

DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM

Con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes o emisiones, para evitar daños a la salud y al ambiente, el Ministerio del Ambiente publicó el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, por el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda.

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 Permisible (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.

Los LMP son obligatorios para todas las PTAR sin distinción de tamaño, ni de nivel de tratamiento. En la Tabla 12 se muestran los LMP vigentes.

Tabla 12: Límites Máximos Permisibles para los efluentes de PTAR

Parámetro	Valor	Unidad
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes y termotolerantes	NMP/100 MI	10000
Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO₅)	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	200
pH		6.5-8.5
Sólidos totales en suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	< 35

FUENTE: D.S.N° 003-2010-MINAM

2.7 Tiempo de retención hidráulica (THR) en reactores:

Para determinar el tiempo de retención, el Manual de evaluación del Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención de la OPS/CEPIS (1992), señala que:

Tradicionalmente se ha empleado el parámetro tiempo o periodo de retención para el diseño de reactores. En las plantas de tratamiento se dan procesos que ocurren muy rápidamente y también con mucha lentitud. Se necesitan tiempos de retención o periodos de contacto cortos o largos para lograr la transferencia o las reacciones necesarias.

Se entiende como tiempo medio de retención o residencia, la permanencia o tiempo de retención (t_0) del flujo en la unidad al cociente, que puede concebirse como el “tiempo promedio en el que el fluido de caudal (Q) pasa a través del reactor del volumen (V)”:

$$t_0 = \frac{V}{Q}$$

Donde:

V= volumen de la unidad

Q = caudal

Expresados en unidades homogéneas.

Indicando que es el tiempo que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir de la unidad, en el caso de que todas las partículas del fluido evolucionaran en la misma forma. Cabe indicar que el caso correspondería al flujo estable ideal. En la práctica, es difícil que esto ocurra, ya que las condiciones hidráulicas del fluido (zonas muertas, corrientes de inercia, cortocircuitos hidráulicos, etcétera) hacen imposibles las condiciones de flujo estable (CEPIS/ OPS, 1992).

2.7.1 Sustancias trazadoras para determinar el tiempo de retención:

CEPIS/ OPS (1992) señala que visualizar el funcionamiento de una unidad desde el punto de vista hidráulico, es conveniente utilizar una sustancia trazadora como:

- a) Colorantes como fluoresceína o rodamina.
- b) Iones como cloruros, especialmente de sodio o potasio, fluoruros o nitratos, especialmente de sodio.
- c) Elementos radiactivos como isótopos.
- d) Ácidos: clorhídrico, benzoico.
- e) Otras sustancias químicas: alizarim, sapirool, naptol

2.7.1.1 Ensayo con Trazadores:

Para determinar el ensayo y el tipo de aplicación (dosificación instantánea o continua) con trazadores, el Manual de evaluación del Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención de la OPS/CEPIS (1992), señala que:

Un ensayo de trazadores consiste en agregar el trazador en el afluente del tanque o reactor que se quiere analizar, con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo (ver Figura 7).

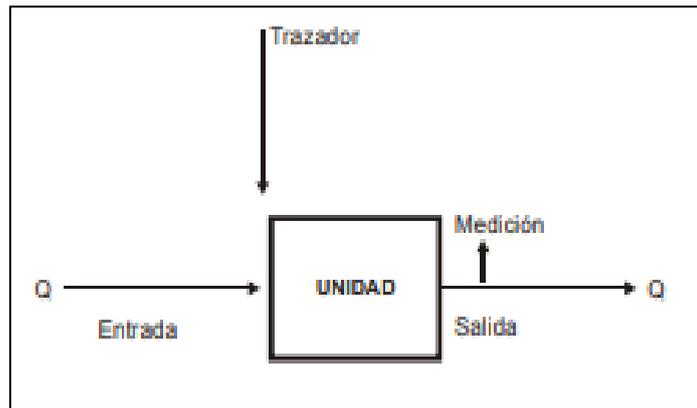


Figura 7: Aplicación de trazadores en un reactor

FUENTE: CEPIS/OPS (1992)

Antes de elegir el tipo de trazador que se va a utilizar, se debe verificar la concentración de estas sustancias en el agua cruda y seleccionar aquellas que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas. También es conveniente escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos que existen en el agua. Por tanto, la concentración total que se determine a la salida será sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada. Esta es la razón por la cual elementos como el cloro son malos trazadores. Por supuesto, en todos los casos hay que esperar que se pierda algo de trazador. Al tener en cuenta estas consideraciones, resulta muy común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de plantas de tratamiento de agua el ion cloruro obtenido de la aplicación del cloruro de sodio. El cloruro de sodio o sal de mesa o cocina es de fácil obtención y bajo costo. Asimismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad (OPS/CEPIS, 1992).

OPS/CEPIS (1992) indica que la aplicación de trazadores puede hacerse de dos maneras, tales como:

a) Dosificación instantánea:

Se aplica una concentración (C_0) a la entrada de la unidad en evaluación en un tiempo muy corto, inferior a $1/30$ del tiempo teórico de retención (t_0) y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua afluyente de la unidad que se piensa analizar.

En la dosificación instantánea, la concentración (C_0) que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua. Para el caso del uso del ion cloruro como trazador, es común usar concentraciones de entre 30 y 50 mg/L.

La cantidad de trazador P (kg) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V \times K \times C_o}{I \times 10^3}$$

Donde:

P = Peso del trazador por añadir al reactor, kg

V = Volumen útil del reactor, m³

K = Constante de corrección

C_o = Concentración, mg/L o g/m³

I = Grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

b) Dosificación continua:

Se aplica la concentración (C_o) continuamente, por un tiempo no menor de tres veces el periodo de retención teórico (t_o), y luego se interrumpe bruscamente la dosificación.

La forma continua tiene la ventaja de permitir establecer comparaciones entre las curvas que se presentan a la entrada del trazador (cuando se inicia la dosificación) y al final (cuando el proceso se paraliza). Además, se obtiene una concentración de equilibrio.

La cantidad de trazador P (kg/h) que se necesita añadir al reactor en evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{K \times Q \times C_o}{I \times 10^3}$$

Donde:

P = Peso del trazador por añadir al reactor, kg

Q = Caudal de la unidad por evaluar, m³/s

K = Constante de corrección

C_o = Concentración, mg/L o g/m³

I = Grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer cómo se desplazan las diferentes masas de agua dentro de las unidades de tratamiento (mezcladores rápidos, floculadores, decantadores), pero los datos obtenidos se refieren solamente al momento en que se hace la prueba, y no representan necesariamente el comportamiento en todas las condiciones (OPS/CEPIS, 1992).

2.7.1.2 Modelos para el análisis del trazador:

OPS/CEPIS (1992) señala modelos para hallar el comportamiento del trazador en un reactor, a continuación, se describirán las pautas para realizar dichos modelos:

Se elabora una tabla con los siguientes criterios:

- **Columna 1:** se registra el número de muestra
- **Columna 2 y 4:** datos del tiempo (t) y concentración (C) respectivamente.
- **Columna 3:** t/t_0 , resulta de la división del tiempo presente de adquisición de la muestra entre el tiempo teórico de retención.
- **Columna 5:** $(C-C_0)$, la resta de la concentración del tiempo presente con la concentración inicial tomada.
- **Columna 6:** $\sum(C-C_0)$, es la sumatoria progresiva de los datos, es decir el sumatorio total actual con la sumatoria siguiente.
- **Columna 7:** $F(t)$, resulta de la división del dato presente entre el sumatorio total, y representa la fracción de la totalidad del trazador que ha llegado a la salida del floculador.
- **Columna 8:** $1-F(t)$, resulta de la diferencia entre la unidad y el valor de $F(t)$. Representa la cantidad de trazador que permanece dentro del floculador.

a) Modelo simplificado de la teoría de Wolf-Resnick

De la columna 8 y 3 (respectivamente) se grafica la Figura 8:

- **Eje de la ordenada:** se presenta en escala logarítmica, los valores de $1-F(t)$, correspondiente a la cantidad de trazador que permanece dentro del reactor.
- **Eje de la abscisa:** se presenta en escala lineal, el tiempo normalizado t/t_0 .

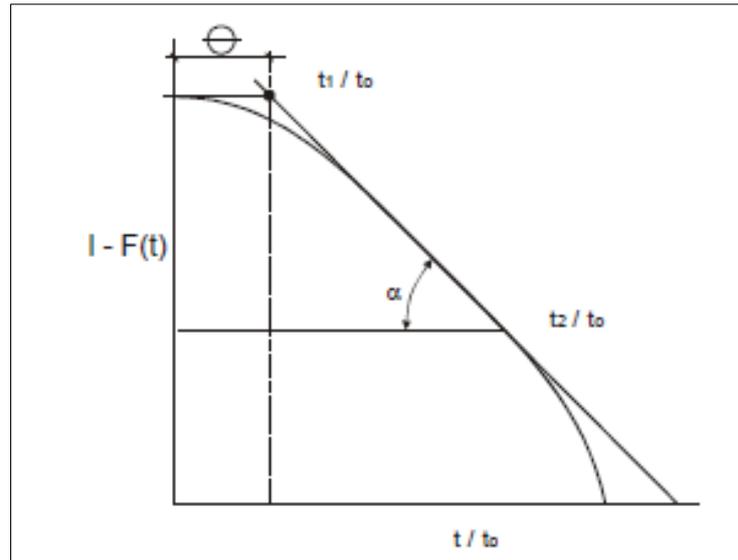


Figura 8: Curva de 1-F(t), cantidad del trazador que permanece en el reactor

FUENTE: CEPIS/OPS (1992)

Calcular:

- **Pendiente:**

$$\tan\alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}}$$

- **Fracción con características de flujo pistón:**

$$p = \frac{\theta}{0.435 + \theta \tan\alpha}$$

- **Espacios muertos:**

$$m = 1 - \frac{\theta}{p}$$

- **El flujo mezclado o mezcla completa:**

$$M = 1 - P$$

b) Análisis por el método de la curva de tendencia:

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida, se obtiene una serie de valores de concentración que aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuyen progresivamente, lo que origina una curva tal como se indica en la Figura 9.

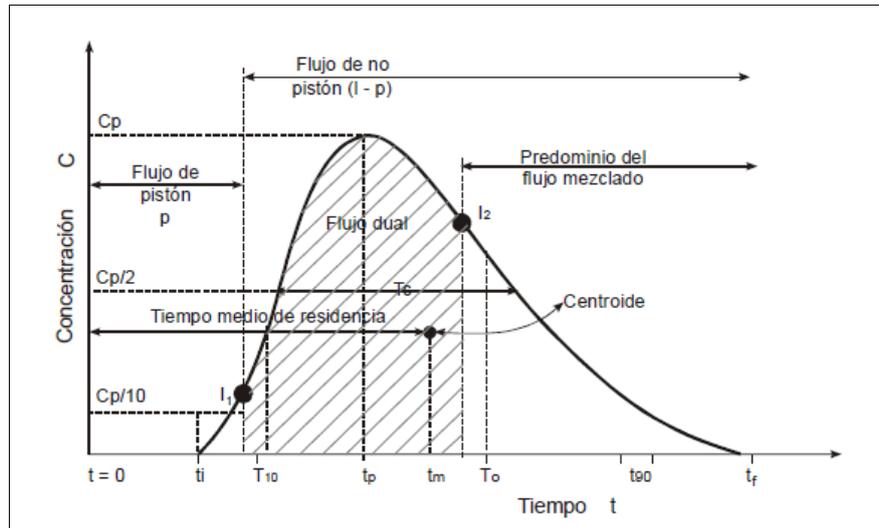


Figura 9: Concentración del trazador en el efluente de un reactor

FUENTE: CEPIS/OPS (1992)

Existen los siguientes parámetros principales:

t_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.

t₁₀ = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador

t_p = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.

t_m = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.

t_o = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = V/Q .

t₉₀ = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

t_f = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.

C_o = concentración inicial.

C_p = concentración máxima a la salida.

Para el análisis de la curva de tendencia se utilizan los siguientes criterios mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13: Criterios para el análisis de la curva de tendencia

CRITERIO	CONDICIONES
ti/to	Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo de pistón y a 0 para el flujo mezclado. Si el valor de la relación es (< 0.3), puede significar que existe paso directo del trazador entre la entrada y la salida (cortocircuito hidráulico).
tm/to	Si la relación es menor que la unidad, existe cortocircuitos hidráulicos. Si es mayor, hay errores experimentales o existen zonas donde el trazador ha quedado retenido por un cierto tiempo (espacios muertos), para luego salir lentamente, con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de tm, haciendo tm > to.
tp/to	Indica la relación de flujo de pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1, existe únicamente flujo pistón, y cuando es 0, existe flujo mezclado. Cuando la relación tp/to se aproxima a 1 y ti/to > 0.5, se puede concluir que existe predominio de flujo de pistón, y cuando se aproxima a 0, existe predominio de flujo mezclado.
tb/to	Está relacionado en general con la difusión debido a corrientes de inercia (turbulencia). Es igual al cociente $\Delta t_o/t_o$ (razón de tiempo de inyección) para el flujo estable ideal y del orden de 2.3 para flujo mezclado ideal.
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	Expresa la excentricidad de la curva y, por lo tanto, es función de la recirculación. Es igual a (0) para flujo de pistón y mayor de 2.3 para flujo mezclado ideal.

FUENTE: CEPIS/OPS (1992)

c) Índice de Morrill:

Este autor encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en porcentajes y dibujados en papel que tenga escala de probabilidades en las abscisas y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta (Figura 10).

El segmento comprendido entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión.

$$IM = \frac{\text{tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{tiempo en que pasa el 10\%}}$$

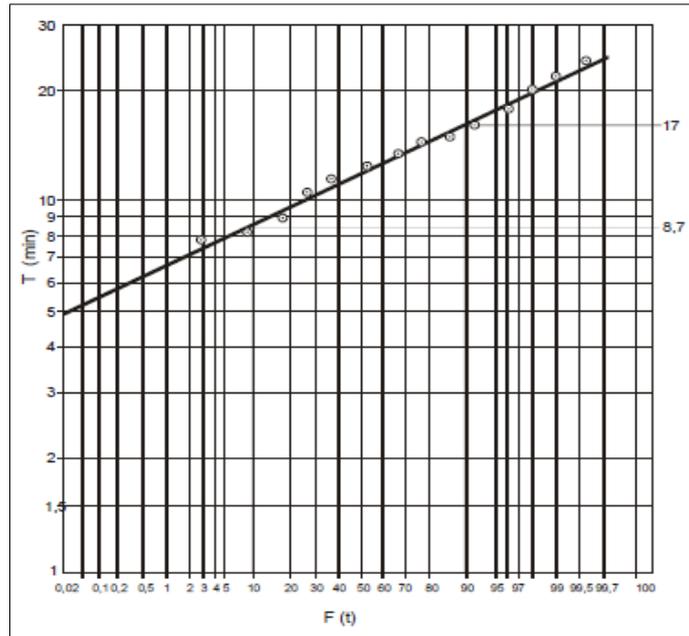


Figura 10: Índice de Morrill

FUENTE: CEPIS/OPS (1992)

2.8 Descripción del sistema integrado de tratamiento

La investigación se desarrolló en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del CEMTRAR, construida gracias al financiamiento del Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

El agua residual proviene de una red de desagüe doméstico de la Urbanización La Estancia de La Molina, desde la cual se conduce hasta la PTAR y se descarga en una cámara de bombeo. Desde allí se impulsa hacia tres líneas de tratamiento compuestas por:

- a) **Primera línea:** un tanque séptico de dos cámaras y un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial.
- b) **Segunda línea:** un tanque baffled de cuatro cámaras y dos humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial.
- c) **Tercera línea:** una celda francesa, seguida por dos humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical.

La Figura 11 muestra el esquema general de las tres líneas de tratamiento y se remarca la línea del sistema integrado tanque séptico y humedal.

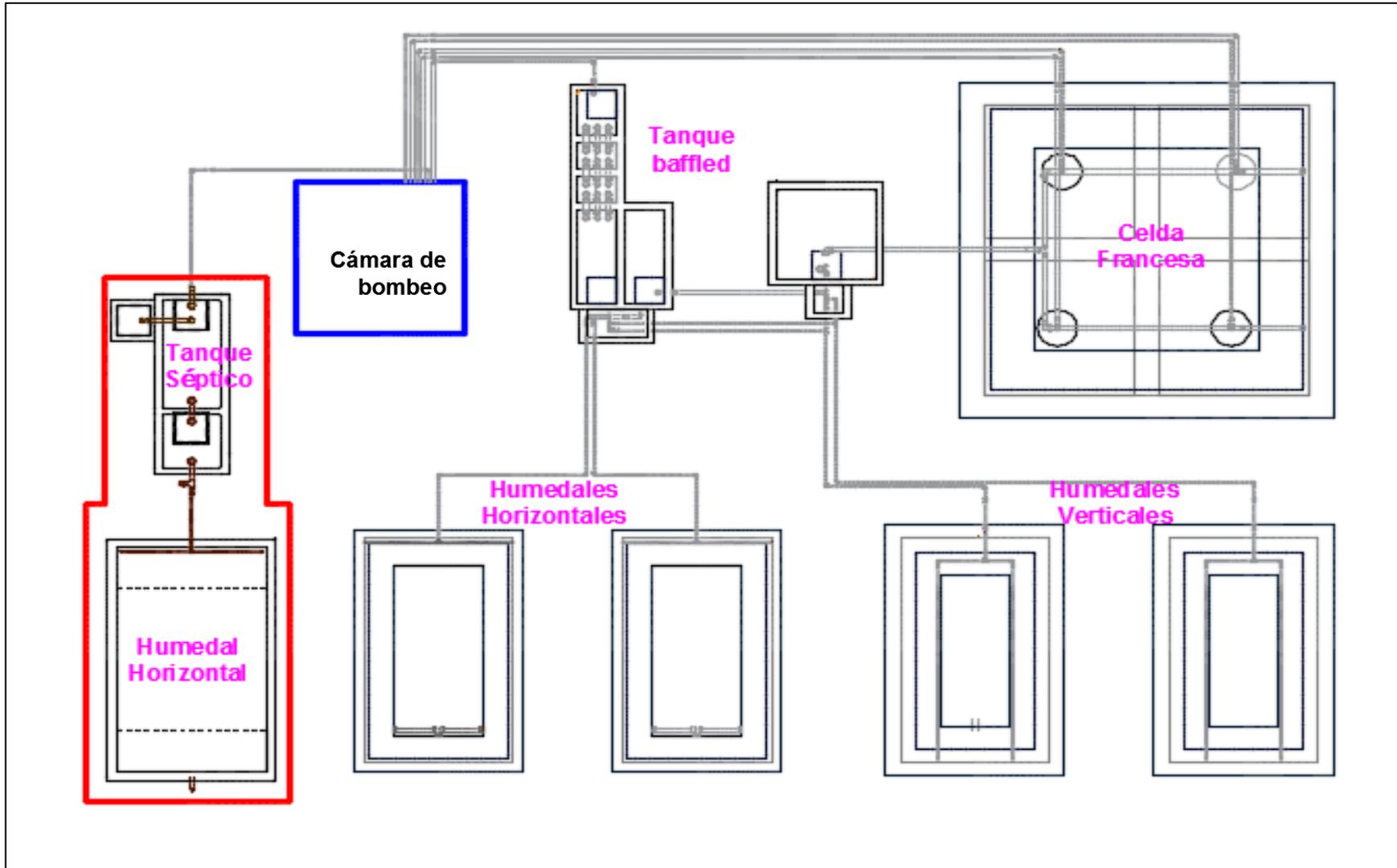


Figura 11: Esquema general de la PTAR

A continuación, se describirán los tratamientos del agua residual cruda del sistema integrado:

a) Pre Tratamiento

El agua residual cruda llega a un buzón situado fuera de la PTAR, el cual contiene una rejilla de 25 mm de abertura, que atrapa los sólidos más gruesos y antes de su ingreso a la cámara de bombeo de la PTAR. Dentro de la cámara se ha instalado una bomba sumergible trituradora marca DAB de 0.75hp, con una velocidad de motor de 3400 rpm y de tipo monofásico, que impulsa el agua residual al sistema integrado tanque séptico y humedal horizontal.

a) Tratamiento Primario

El tratamiento primario consta de un tanque séptico compuesto por dos cámaras: la primera de 2.40 m x 1.20 m x 1.85 m; y la segunda cámara de 1.20 m x 1,20 m x 1.70 m.

La primera cámara tiene una pendiente del 2% orientada hacia el ingreso del agua; en dicha zona se ha instalado una tubería de succión para extracción de lodos, los cuales descargan a una caja de 0.70 m x 0.70 m x 0.38 m (ver Figura 12).



Figura 12: Caja de Extracción de lodos

El tanque séptico ha sido diseñado para una población de 75 personas, con un caudal de 40 l/hab-día. Para el dimensionamiento se usó una relación largo/ancho de 3:1, lográndose un tanque de 3.60 m de largo x 1.20 m de ancho. El periodo de retención según diseño fue de 11 horas. El volumen de sedimentación fue de 1.37 m³ y el volumen de digestión y almacenamiento de lodos de 4.88 m³ con una tasa de acumulación de lodos de 65 L/hab.año y un intervalo de limpieza de 1 año (ver Figura 13 y 14).

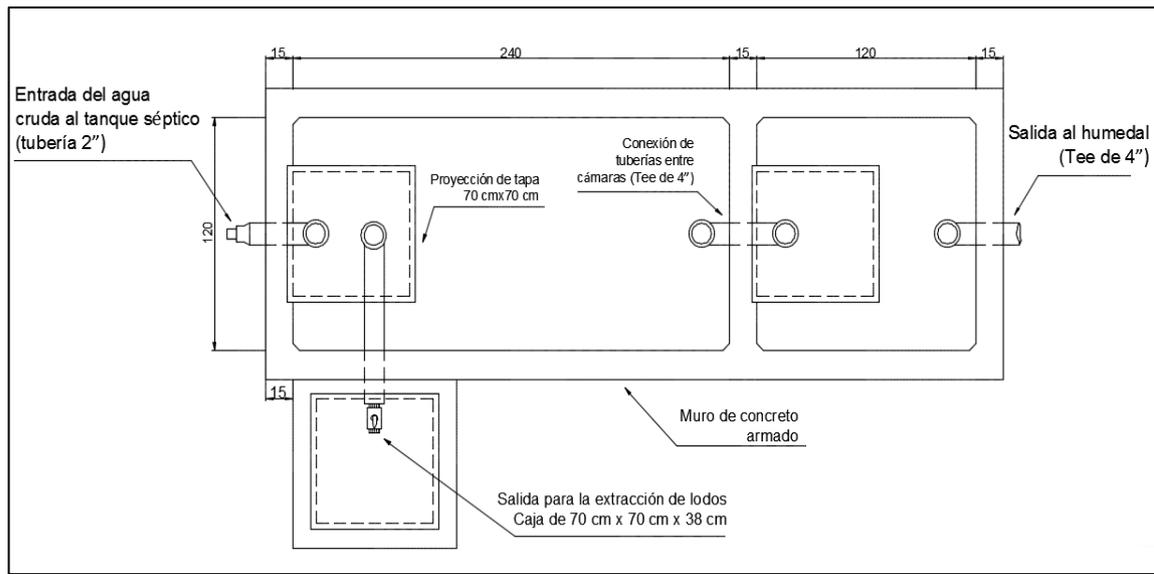


Figura 13: Vista en planta del tanque séptico

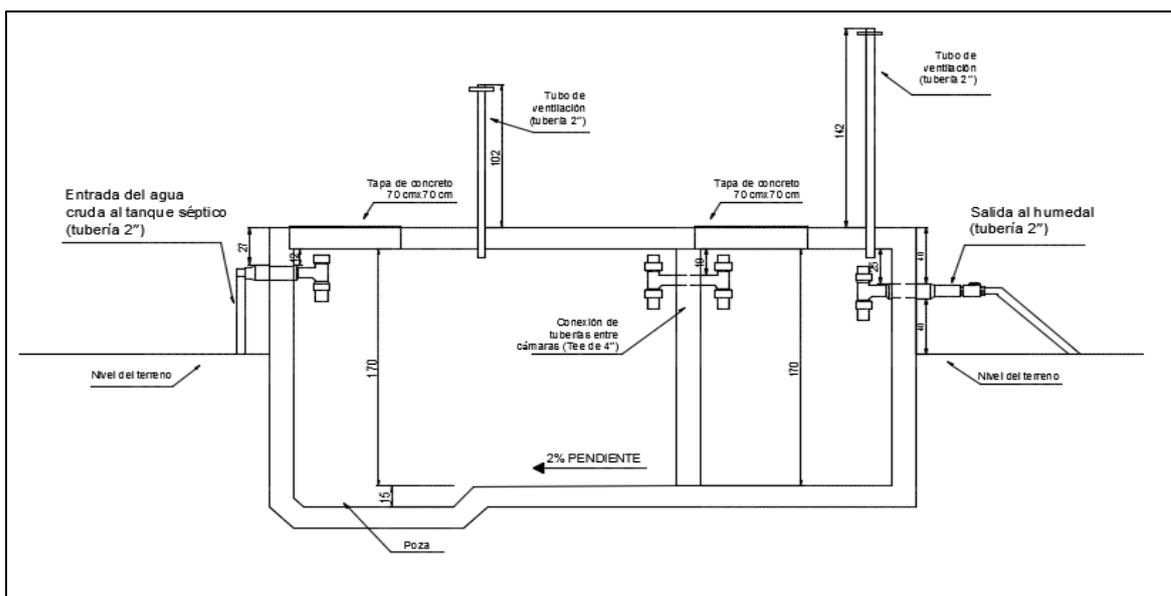


Figura 14: Vista en corte del tanque séptico

b) Tratamiento Secundario:

El humedal horizontal de flujo subsuperficial ha sido diseñado para un caudal de 3 m³/día. Se consideró para el diseño una demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 150 mg/L al ingreso del humedal, el material de relleno es arena gravosa con una conductividad hidráulica de 1000 m³/m²día y porosidad de 38%. Se usó una relación largo/ancho de 2:1 para su construcción, lográndose un humedal de concreto de 5.00 m de largo x 3.00 m de ancho x 0.80 m de profundidad, y una pendiente de 1% para el fondo del lecho.

La zona de entrada y salida del humedal se rellenó con piedra chancada de ¾" (3 m de ancho x 0.90 m de largo y 0.60 m de altura), y el centro de confitillo (3 m de ancho x 3.20 m de largo x 0.60 m de altura). La tubería de ingreso al humedal tiene 2.85 m de longitud y un diámetro de 2 pulgadas, con perforaciones para la salida del agua residual de 8 mm de diámetro. El nivel de agua a la salida se controla con un codo de 4 pulgadas. Dentro del humedal se colocaron 4 tubos testigos de 4 pulgadas de diámetro y 1 m de altura (ver Figura 15 y 16).

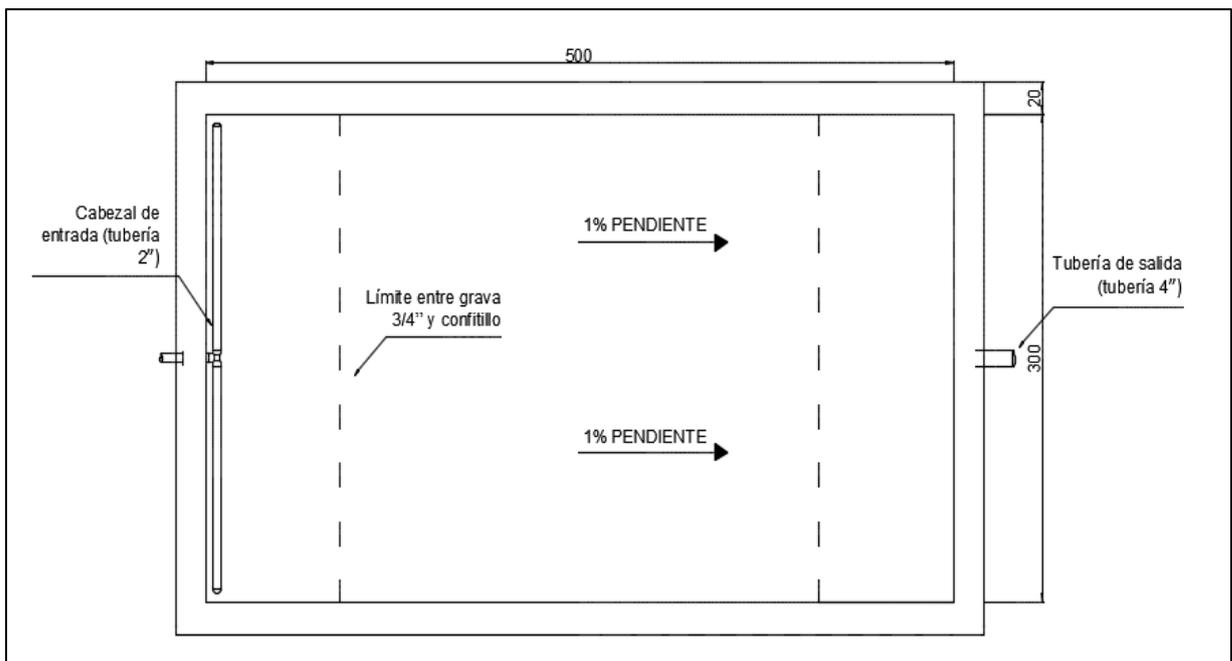


Figura 15: Vista en planta del humedal horizontal

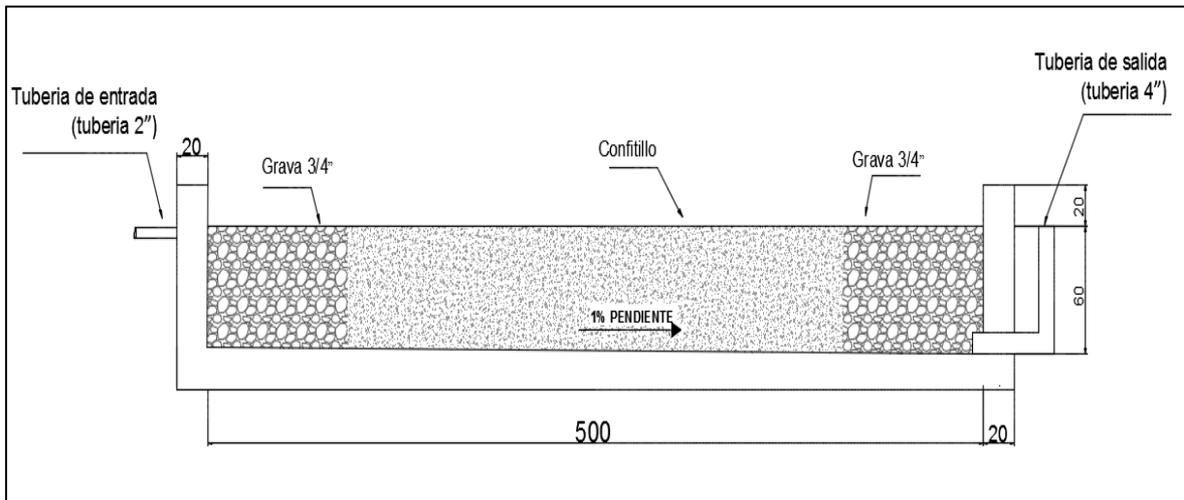


Figura 16: Vista en corte del humedal horizontal

c) Operación del tablero de control:

La planta piloto contiene además del tanque séptico, otras unidades de tratamiento que se alimentan desde la cámara de bombeo. La operación de las bombas se maneja automáticamente mediante un tablero eléctrico con sistema scada, que registra la información de operación en una página web (ver Figura 17).

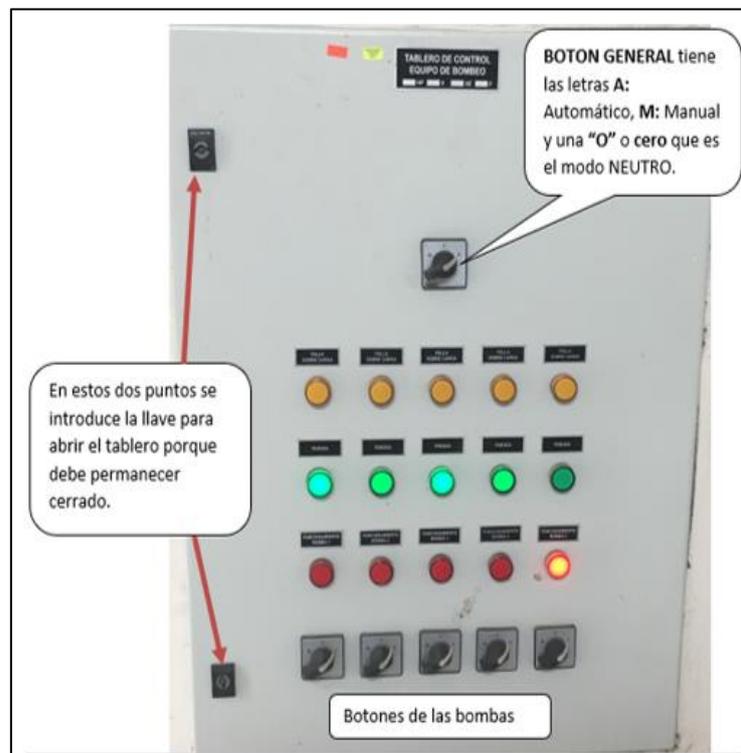


Figura 17: Tablero eléctrico

El agua residual es impulsada mediante 4 bombas (ver Figura 18) conectadas a tuberías de 2 pulgadas que alimentan cada sistema de tratamiento dentro de la PTAR; y tienen su propio tiempo de bombeo, el cual puede ser modificado:

- **Bomba 1 y 2:** hacia la celda francesa.
- **Bomba 3:** hacia el tanque séptico.
- **Bomba 4:** hacia el tanque Baffled.
- **Bomba 5:** hacia los humedales verticales y hacia el reservorio al lado del tanque Baffled. Dependiendo si las válvulas están abiertas o cerradas.

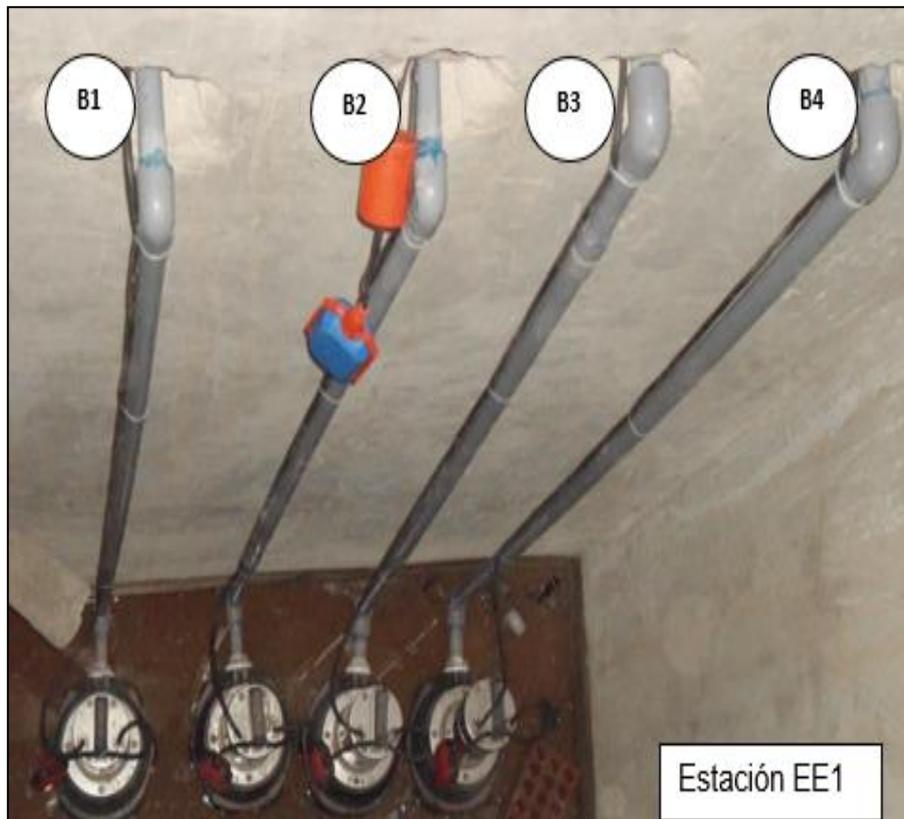


Figura 18: Bomba 1, 2, 3 y 4 ubicadas en el pozo de bombeo (EE1)

III. MATERIALES Y METODOS

Se realizó el monitoreo del sistema, evaluando la calidad del agua residual al ingreso y salida del sistema; se evaluó el comportamiento hidráulico y la adaptación de la especie vegetal sembrada en el humedal, antes de iniciar el monitoreo se realizó la adecuación del sistema de tratamiento.

3.1 Adecuación del sistema:

Estado del sistema:

- 1) Se evaluó la operación del tablero de control, mediante los botones de encendido y apagado. Se verificó el funcionamiento correcto de las bombas mediante el tablero y la señal del scada a la página web.
- 2) El sistema de tratamiento ha estado operando desde el año 2012, por lo que se realizaron las siguientes actividades:
 - Limpieza de lodos presentes en la cámara de bombeo.
 - Revisión de la bomba Nro. 3 (correspondiente al tanque séptico), ubicada dentro de la cámara de bombeo, quitándole los residuos encontrados dentro de la válvula check o dentro de la misma bomba.
 - Limpieza de la primera cámara del tanque séptico, se retiraron los lodos contenidos.
 - Revisión de las tuberías de ingreso al humedal, retirando el material depositado.
 - Control del nivel de agua a la salida del humedal horizontal.
 - Lavado de gravas y gravillas del lecho del humedal, con agua limpia para retirar material atrapado.
- 3) Se realizaron mediciones para determinar el tiempo de bombeo:
 - Al ingreso del tanque séptico.
 - A la salida del tanque séptico; para facilitar la medición se instalaron dos válvulas de bola y una tee (ver Figura 19).



Figura 19: Válvulas bola

– En la caja de registro en la salida del humedal, en el codo de control de nivel.

En los tres casos se tomaron 10 mediciones con un balde tomando nota del tiempo de llenado en un volumen determinado (método volumétrico).

4) Siembra de la especie vegetal; se eligió una especie macrófita de tipo ornamental, la cala (*Zantedeschia aethiopica*). El objetivo fue evaluar adicionalmente la posibilidad de darle un uso comercial a la especie utilizada.

Se sembraron rizomas de cala en un marco de 30 cm de espaciamiento entre ellas y a una profundidad de 15 cm de la superficie (ver Figura 20 y 21).



Figura 20: Rizomas de *Zantedeschia Aethiopica*



Figura 21: Rizoma plantado a una profundidad de 15 cm

3.2 Monitoreo de la calidad del agua en el sistema de tratamiento:

Se realizó un monitoreo semanal durante 6 semanas, entre los meses de Agosto y Setiembre.

Para evaluar la calidad del agua se establecieron 3 puntos de muestreo, (1) ingreso del agua residual doméstica (afluente), (2) salida del tanque séptico y (3) salida del humedal (ver Figura 22).

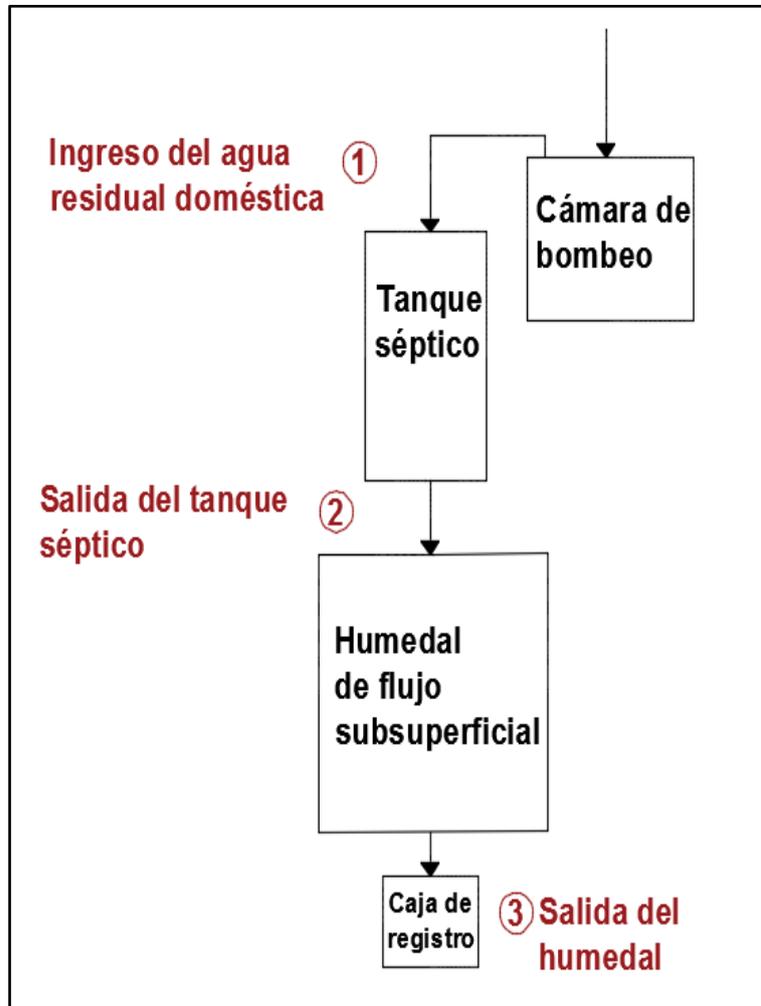


Figura 22: Puntos de muestreo del sistema tanque séptico y humedal

Se analizaron parámetros de campo tal como se muestra en la Tabla 14, donde se observan además los equipos utilizados.

Los otros parámetros fueron analizados en el laboratorio de Saneamiento y Medio Ambiente de la UNALM. En la Tabla 15 se indican los equipos utilizados.

Tabla 14: Equipos utilizados en campo

Lugar de muestreo	Parámetro a medir	Equipo	Método de ensayo
Campo	pH	Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+B, 22nd Ed.(Campo)
	Conductividad eléctrica (us/cm)	Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed.(Campo)
	Temperatura (C°)	Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510B, 22nd Ed.(Campo)
	Oxígeno disuelto (mg/l)	Medidor de oxígeno disuelto portátil HQ30D con sensor de OD luminiscente	Electrometric Method 4500-OG

Tabla 15: Equipos utilizados en laboratorio

Lugar de muestreo	Parámetro a medir	Equipo	Método de ensayo
Laboratorio	Turbiedad (NTU)	Portable Turbidimeter HACH 2100Q	APHA, AWWA, WPCF (17th Ed. 1992) 2130-B. pág. 2-83
	Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	DRB 200 marca HACH y Espectrofotómetro DR 6000	Usepa Reactor Digestion Dicromate Method
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	BODTrakTM II de la marca HACH y la Incubadora Ambi-Hi-LO CHAMBER	Respirometric Method BODTrakTMII
	Nitrógeno amoniacal (mg/l)	DRB 200 marca HACH y Espectrofotómetro DR 6000	USEPA Nitrogen-Amonia,Salicylate (50.0 mg/l)
	Nitrato (mg/l)	Espectrofotómetro DR 6000	USEPA Nitrate, Cadmium Reduction Method (0.3 to 30.0 mg/L)
	Fosfato (mg/l)	DRB 200 marca HACH y Espectrofotómetro DR 6000	USEPA PhosVer 3 with Acid Persulfate Digestion Method (0.06 to 3.50 mg/L)
	Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	Bomba de Succión eléctrica modelo YX930D y para el secado de muestras se utilizó el horno marca BINDER	APHA, AWWA, PWPCF (17th ed. 1992) 2540-D pág.2-83
		Lab. Incubator - Digisystem	

	Coliformes Totales (NMP/100ml)	SMEWW-APHA-AWWA- WEF (21 st Ed. 2005, Part 9221)
--	-----------------------------------	--

3.2.1 Número de muestras:

Se realizó un monitoreo semanal durante 6 semanas, para obtener un total de 6 muestras por parámetro. En la Tabla 16 se muestra el número de análisis por parámetro.

Tabla 16: Número de análisis por parámetros

Parámetros	Ingreso del agua residual doméstica	Salida del tanque séptico	Salida del humedal
Medición en campo			
T (°C)	6	6	6
Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)	6	6	6
pH	6	6	6
Oxígeno disuelto (mg/l)	6	6	6
Medición en laboratorio			
Turbiedad (NTU)	6	6	6
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	6	6	6
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	6	6	6
Fosfato (mg/l)	6	*	6
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	*	6	6
Nitrato (mg/l)	*	*	6
Sólidos Suspendidos (mg/l)	6	6	6
Coliformes Totales (NMP/100ml)	6	6	6

* No fue representativa su medición en esta etapa del sistema

3.2.2 Eficiencia de remoción:

Se evaluó la eficiencia de remoción de carga contaminante para los parámetros medidos:

$$E = 1 - \frac{(Cf)x100}{(Ci)}$$

Dónde:

E= Eficiencia de remoción del sistema (%)

Ci= Carga contaminante de entrada (mg)

Cf= Carga contaminante de salida (mg)

3.3 Evaluación del crecimiento de la especie vegetal:

Se monitoreó la especie vegetal sembrada en el humedal durante todo el periodo de investigación. Se observó:

- Facilidad de crecimiento y altura de la planta
- Plagas presentes
- Floración

3.4 Parámetros de operación del tanque séptico:

- **Caudal de operación:** Se midió el caudal en la entrada del tanque séptico (caudal de aporte de agua residual que entra al sistema) y salida del tanque séptico. Se utilizó el método volumétrico, se tomaron mediciones usando un balde de plástico de 4 litros y se anotó el tiempo de llenado. Estos datos permitieron hallar el caudal promedio instantáneo, a partir de este valor se calcularon los caudales promedios diarios.
- **Tiempo de retención:**
 - El tiempo de retención se calculó en función al caudal de aporte unitario (Lt/hab.día) y la población servida (NORMA TÉCNICA I.S. 020).

$$PR = 1.5 - 0.3 \times \log(P \cdot q)$$

Dónde:

PR= Tiempo promedio de retención hidráulica, en días

P= Población Servida

q= Caudal de aporte unitario de aguas residuales, Lt/hab.día

Considerando que al multiplicar la población servida por el caudal de aporte unitario de aguas residuales se obtuvo 2.7 m³/día, siendo este el caudal de entrada del tanque séptico.

3.5 Parámetros de operación del humedal artificial:

- **Caudal de operación:** Se midió el caudal de entrada y salida del humedal. Se utilizó el método volumétrico, se tomaron mediciones usando un balde de plástico de 4 litros y se anotó el tiempo de llenado. Estos datos proporcionaron el caudal promedio instantáneo, a partir de este valor se calcularon los caudales promedios diarios.

- **Carga orgánica:** Se midió la carga orgánica (C) en función a los valores de DBO medidos al ingreso y salida del humedal, se utilizó la ecuación de Sherwood (1998) citado en Gomez (2017):

$$C = \frac{Qx(DBO_i - DBO_f)}{A_s}$$

Dónde:

C= carga orgánica en (g/m². día)

Q= Caudal pre-tratado de ingreso (m³/día)

DBOf= Valor promedio de la DBO₅ a la salida del humedal (mg/l)

DBOi= Valor promedio de la DBO₅ a la entrada del humedal (mg/l)

As= Área superficial del humedal artificial (m²)

- **Carga hidráulica:** Se midió la carga hidráulica (CH) en base al caudal y la superficie del humedal, se utilizó la ecuación de Sherwood (1998) citado en Gomez (2017):

$$CH = \frac{Q}{A_s}$$

Dónde:

Q= Caudal de circulación en el humedal (m³/s)

As= Área superficial del humedal (m²)

CH= Carga hidráulica aplicada (m³/m².día)

- **Área requerida por habitante equivalente:** Se calculó en función a la carga orgánica y el aporte per cápita de DBO, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$PE = \frac{Q \times DBO}{A_p}$$

Dónde:

PE= Habitante Equivalente (hab.eq)

Q= Caudal (m³/día)

DBO₅= Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l o g/m³)

AP = Aporte per cápita DBO (50g/hab.día)

$$\text{Área requerida por habitante equivalente (m}^2\text{/hab.eq)} = \frac{A_t}{PE}$$

Dónde:

At= Área total de la superficie de tratamiento (m²)

PE= Habitante Equivalente

- **Tiempo de retención:**

En el humedal artificial el tiempo de retención se midió mediante la prueba del trazador, utilizando cloruro de sodio (NaCl). El ingreso del trazador en el fluido fue por dosificación instantánea, diluyendo en agua y vertiéndolo en un tiempo corto.

La cantidad de trazador añadida al humedal fue de 0.261 kg, se midió la salinidad a la salida del humedal utilizando el equipo Multi-Parameter PCSTestr 35 de la marca OAKTON. Después de la aplicación del trazador se midió la salinidad del efluente del humedal desde que empieza el primer bombeo (se tomó 4 muestras por bombeo) hasta que terminó de salir todo el trazador (la concentración de salinidad final debió ser igual a la inicial), tomando el tiempo que demora este proceso.

CEPIS/OPS (1992) muestra la ecuación que permite calcular el peso del material del trazador de acuerdo al volumen sobre la unidad a analizar:

$$P = \frac{VxKxC_0}{I \times 10^3}$$

Dónde:

P= Peso del trazador por añadir al reactor (Kg)

V= Volumen útil del reactor (m³)

K= Constante de corrección para Cloruros ($P = \frac{\text{Peso NaCl}}{\text{Peso CL}} = 1.65$)

C₀= Concentración del trazador (mg/L), la concentración que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua (30-50 mg/L).

I= Grado de pureza del Cloruro de Sodio (90%)

Para el análisis de los resultados se analizará la curva de variación de la concentración del trazador (acápito 2.7.1.2).

3.6 Evaluación estadística:

Se realizó mediante la estadística descriptiva de las muestras del tratamiento primario, secundario y de todo el sistema integrado, para comparar el comportamiento de las muestras durante las 6 semanas muestreadas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Adecuación del sistema:

4.1.1 Estado del sistema:

Debido que la limpieza no se realizó desde que empezó a operar el sistema de tratamiento, se encontró:

- Lodos presentes en la cámara de bombeo, la cual fue limpiada con una bomba de lodos sumergibles (ver Figura 23 y 24).



Figura 23: Cámara de bombeo antes de la limpieza



Figura 24: Cámara de bombeo limpia

- Residuos atascados en la válvula check (ver Figura 25), instalada en la tubería de 2 pulgadas que distribuye el agua residual hacia el sistema de tratamiento y en la mariposa de la bomba Nro. 3.



Figura 25: Residuos atascados en la válvula check

- Lodos en la primera cámara del tanque séptico, la cual fue limpiada con una bomba de lodos sumergibles.
- Material sólido obstruyendo los agujeros de la tubería de ingreso al humedal por donde sale el agua residual. La tubería fue limpiada con un trapo a lo largo y sus huecos con un alambre (ver Figura 26).



Figura 26: Limpieza de tubería de ingreso al humedal

- Material sólido retenido dentro del humedal, se limpió con descargas de agua limpia (inundándolo) para el lavado de la grava y el confitillo.

4.1.2 Evaluación del tiempo y frecuencia de bombeo:

Al inicio, el sistema integrado tanque séptico y humedal estuvo alimentándose durante 7 min cada hora, el caudal hallado excedía al caudal de diseño del tanque séptico por ello se modificó el tiempo de bombeo para esta investigación a un intervalo de 2 min cada dos horas durante las 24 horas del día.

4.1.3 Medición de caudales:

Con el nuevo tiempo de bombeo de 2 minutos cada dos horas, se encontraron los siguientes caudales:

a) Caudal a la entrada del tanque séptico:

Durante el tiempo de bombeo se midió el caudal promedio instantáneo L/seg, a partir de este valor se calculó el caudal diario. Los datos medidos se muestran en la Tabla 17, encontrándose un caudal promedio instantáneo de 1.87 l/s y un caudal promedio diario de 2.70 m³/día, obtenido al considerar un tiempo de bombeo de 2 minutos cada 2 horas. Este valor fue bastante próximo al caudal del diseño de 3m³/día (ver Anexo 1.1).

Tabla 17: Resultados de medición de caudal a la entrada del tanque séptico

ítem	Caudal instantáneo (l/s)
1	1.57
2	1.85
3	2.02
4	1.76
5	2.08
6	2.22
7	1.62
8	2.14
9	1.59
Caudal promedio	1.87
Caudal promedio (m³/ día)	2.70

b) Caudal de salida del tanque séptico:

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos del caudal promedio instantáneo en l/seg, a partir de este valor se calculó el caudal promedio diario a la salida del tanque séptico. El tiempo de salida del agua del tanque séptico al humedal fue de 15 minutos aproximadamente.

Tabla 18: Resultados de medición de caudal a la salida del tanque séptico

item	Caudal instantáneo (l/s)
1	0.37
2	0.42
3	0.50
4	0.53
5	0.57
6	0.61
7	0.58
8	0.54
9	0.43
10	0.35
Caudal promedio	0.49
Caudal promedio (m³/ día)	2.65

Los resultados muestran que el caudal promedio instantáneo fue de 0.49 l/s, y un caudal promedio diario de 2.65 m³/día.

c) Caudal de salida del humedal horizontal:

El efluente del sistema salía cada cuatro horas durante 20 minutos aproximadamente. En la Tabla 19 se muestra los resultados obtenidos del caudal promedio instantáneo en l/seg, y el valor del caudal promedio diario, que se obtuvo del caudal promedio instantáneo. Los resultados muestran que el caudal promedio instantáneo fue de 0.39 l/s, obteniendo un caudal promedio diario de 2.64 m³/día.

Tabla 19: Resultados de medición de caudal en la salida del humedal

ítem	Caudal instantáneo (l/s)
1	0.08
2	0.18
3	0.29
4	0.36
6	0.43
7	0.52
9	0.54
10	0.71
11	0.67
12	0.53
13	0.37
14	0.34
15	0.20
16	0.18
17	0.09
Caudal promedio	0.39
Caudal promedio (m3/ día)	2.64

4.2 Monitoreo de la calidad del agua:

a) Temperatura:

En la Figura 27 se tienen los valores promedios de temperatura muestreados en campo (ver Anexo 5.1).

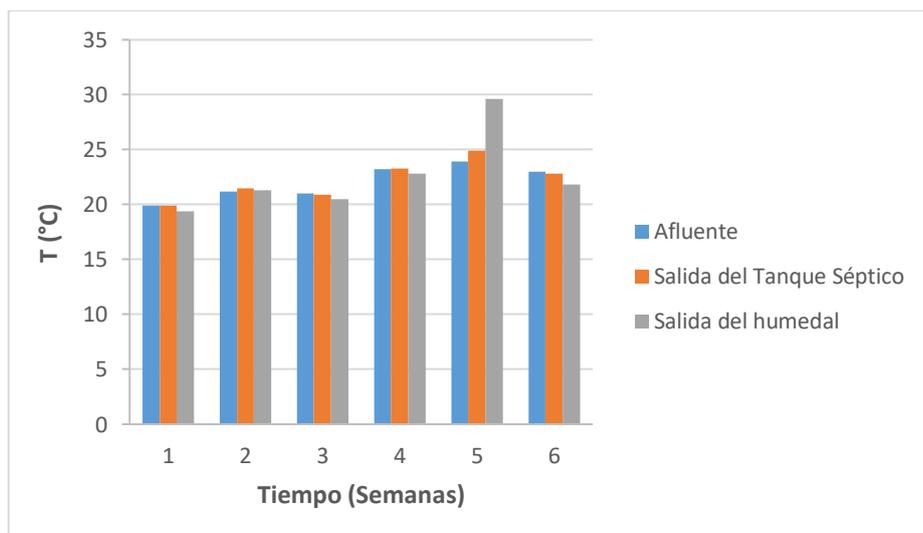


Figura 27: Variación de temperatura durante el periodo de muestreo

Los datos muestran que el afluente del sistema, a la salida del tanque séptico y a la salida del humedal tiene valores de temperatura promedios de 22.03 °C, 22.22°C y 22.6 °C respectivamente. “La temperatura de un agua residual varía de estación en estación y también con la posición geográfica, en regiones cálidas la variación será de 13 a 30°C” (Miranda, 2010).

La temperatura del agua residual es aceptable en el sistema tanque séptico y humedal. Así también la temperatura del agua residual en el humedal resulta tolerable para el desarrollo de la actividad microbiana y el crecimiento de las calas (especie vegetal sembrada), “tolerando temperaturas de 12°C hasta 23 °C” (Pizano, 1999).

b) pH:

En la Figura 28 se tienen los valores promedios de pH muestreados durante 6 semanas en los 3 puntos de muestreo establecidos (ver Anexo 2.1).

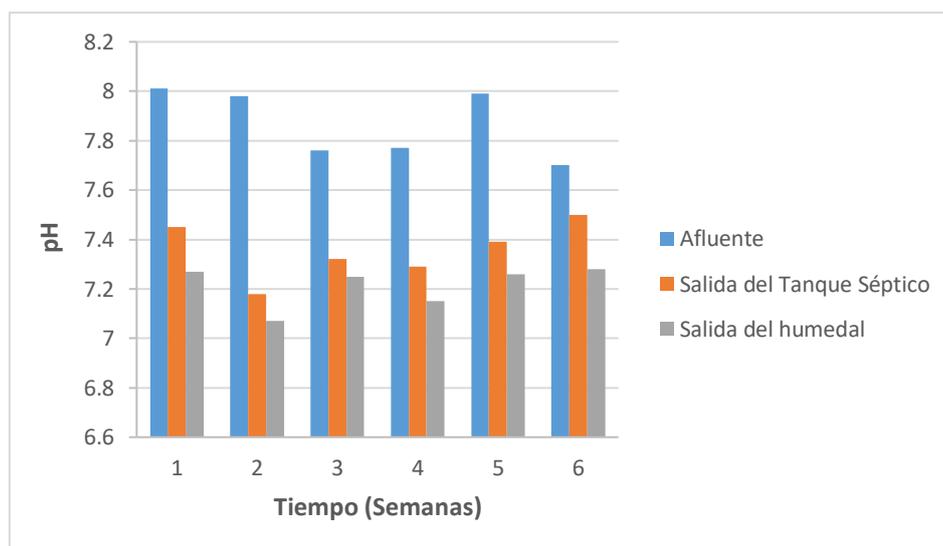


Figura 28: Variación de pH durante el periodo de muestreo

La actividad bacteriana libera CO₂ que tiende a bajar el pH. Las lagunas anaeróbicas y facultativas operan eficientemente con pH ligeramente alcalino (Menéndez & Pérez, 2006). Los resultados muestran que el promedio del pH fue de 7.87 en el afluente, después del tratamiento primario y secundario se muestran valores ligeramente inferiores, siendo los valores promedios a la salida del tanque séptico de 7.36 y a la salida del humedal de 7.21.

c) Conductividad eléctrica:

En el Figura 29 se observan los valores promedios de conductividad eléctrica, dichos valores disminuyen en el tanque séptico, en donde el afluente tiene un promedio de 1498.67 us/cm

y en la salida del tanque séptico de 1440.33 us/cm, y disminuye en la salida de los humedales, con un promedio de 1430 us/cm (ver Anexo 2.2).

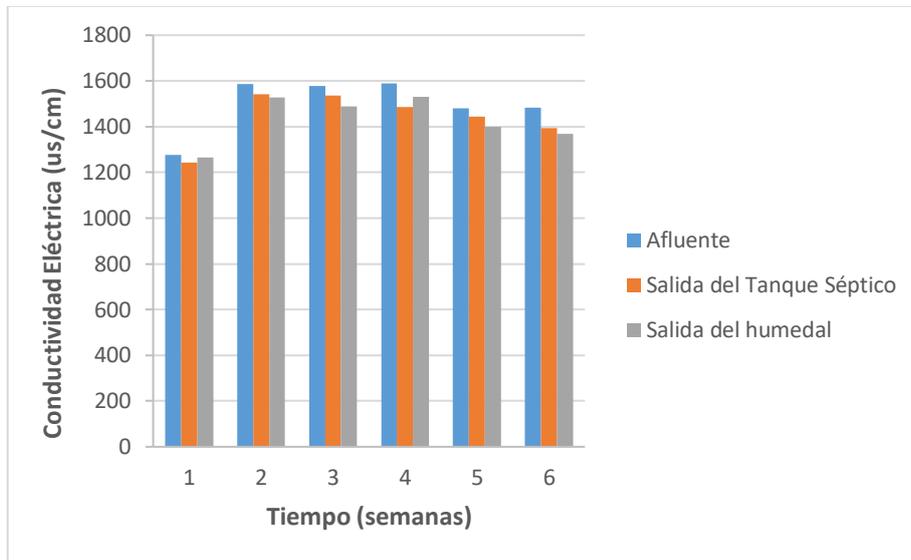


Figura 29: Variación de la conductividad eléctrica durante el periodo de muestreo

Los valores obtenidos muestran que conforme se va tratando el agua residual dentro del sistema primario y secundario, hay ligeras disminuciones en la conductividad, debido a que la conductividad permite conocer la concentración de especies iónicas presentes en el agua y en el tratamiento del sistema no se esperan reducciones.

En el estudio realizado por Figueroa (1999) se reportan disminución en la conductividad eléctrica en su efluente sembrado con calas, con un tiempo de retención de 2.5 días (ver Tabla 7), mayor al tiempo de retención del humedal (ver Acápite 4.5.1).

d) Turbiedad:

En el Figura 30 se observan los valores promedios de turbiedad, los cuales tienen un promedio en el afluente de 262.20 NTU, en la salida del tanque séptico de 87.08 NTU y salida del humedal de 27.58 NTU. En todo el sistema integrado tanque séptico y humedal se obtuvo una eficiencia de remoción del 89.5% (ver Anexo 3.1).

La eficiencia de remoción del tratamiento primario es del 65.21%, siendo valores similares a los encontrados por Maldonado (2005) que fueron del 60%.

En el humedal horizontal se obtuvieron eficiencias de remoción del 68.55%, siendo valores similares a los encontrados por Figueroa (1999) que fue del 69%, con un tiempo de retención de 2.5 días.

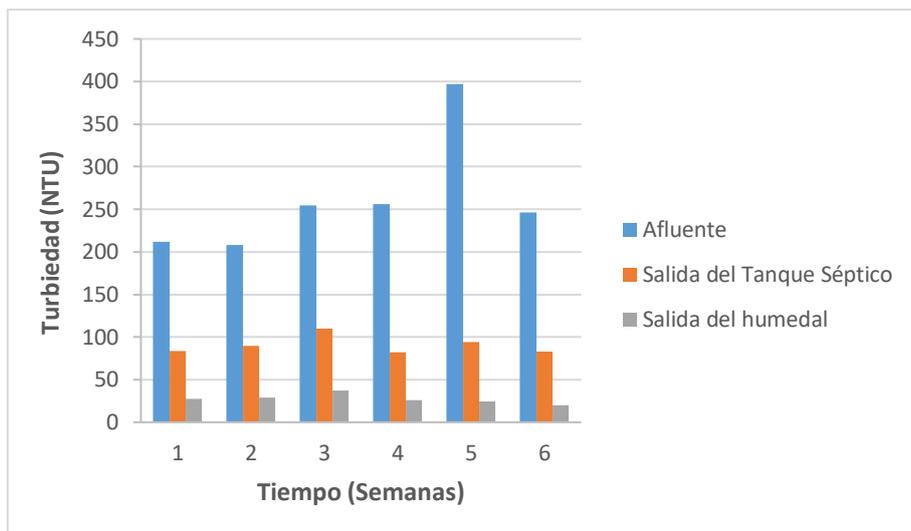


Figura 30: Variación de la turbiedad durante el periodo de muestreo

e) Oxígeno disuelto:

En el Figura 31 se observan los valores promedios de oxígeno disuelto, los cuales tienen un promedio en el afluente de 0.14 mg/l, en la salida del tanque séptico de 0.13 mg/l y salida del humedal de 0.30mg/l (ver Anexo 2.3).

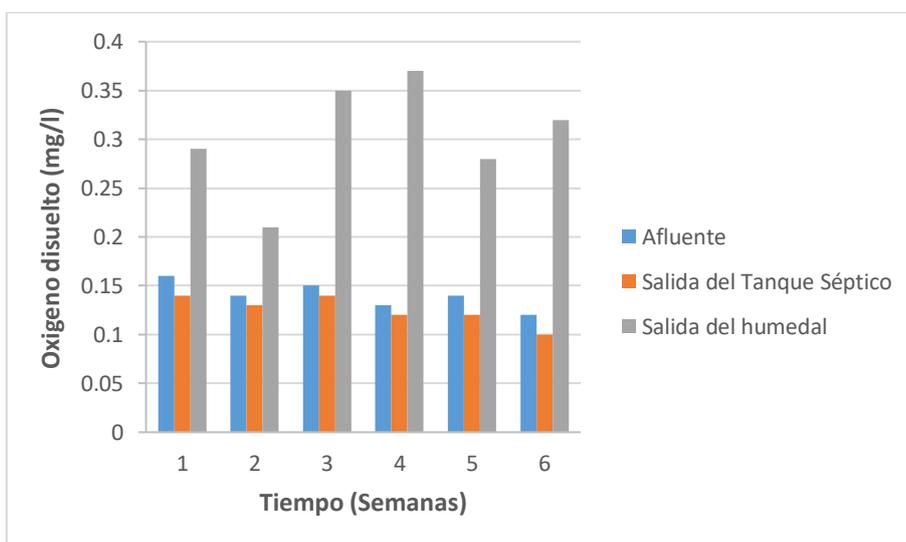


Figura 31: Variación del oxígeno disuelto en el periodo de muestreo

Las concentraciones de entrada y salida del tanque séptico son cercanas a cero, donde se puede notar que es un proceso anaerobio. Sin embargo, las concentraciones obtenidas en la salida del humedal aumentan ligeramente, debido que la capa superficial del estrato tiene contacto con el aire y las plantas aportan oxígeno.

f) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En el Figura 32 se observan los valores promedios de DBO₅, los cuales tienen un promedio en el afluente de 387.50 mg/l, en la salida del tanque séptico 146.17 mg/l y salida del humedal 58.17 mg/l (ver Anexo 3.5).

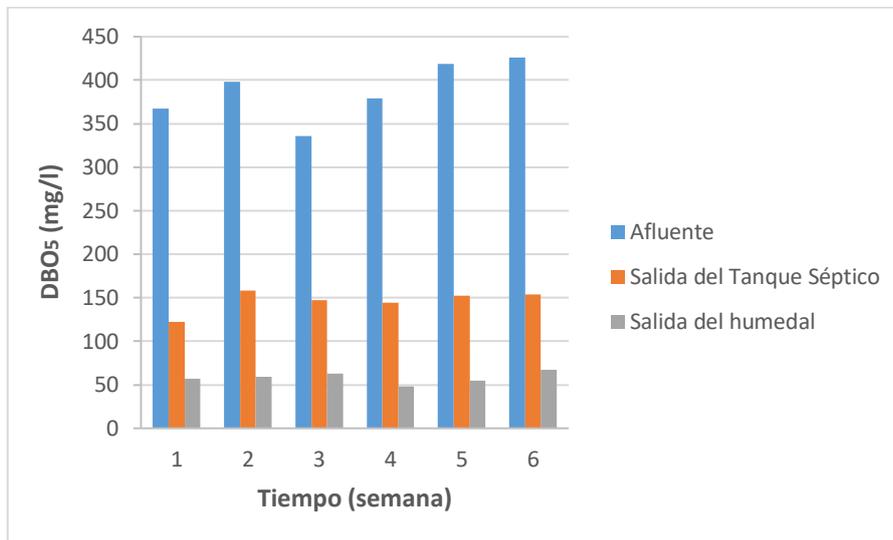


Figura 32: Variación de la DBO₅ en el periodo de muestreo

El sistema tanque séptico y humedal obtuvo un porcentaje de remoción de 85%.

El porcentaje de remoción de la DBO₅ en el tratamiento del tanque séptico fue de un 62.15%, siendo un valor superior al citado por USEPA (2002) señalando que las eficiencias típicas de eliminación de DBO₅ en tanques sépticos son del 30 al 50 %.

En el humedal horizontal se obtuvieron porcentajes de remoción de 60.01% con un tiempo de retención de 16.33 horas, estos valores son similares a Figuera (1999) que reporta porcentaje de remoción del 66% con un tiempo de retención de 2.5 días; mientras que Zurita et al. (2008) obtuvo eficiencias del 79%, con un tiempo de retención de 4 días, usando cala como especie vegetal en ambos casos.

g) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En el Figura 33 se observan los valores promedios de DQO, los cuales tienen un promedio en el afluente de 690.17 mg/l, en la salida del tanque séptico de 269.50 mg/l y salida del humedal de 128.50 mg/l (ver Anexo 3.6).

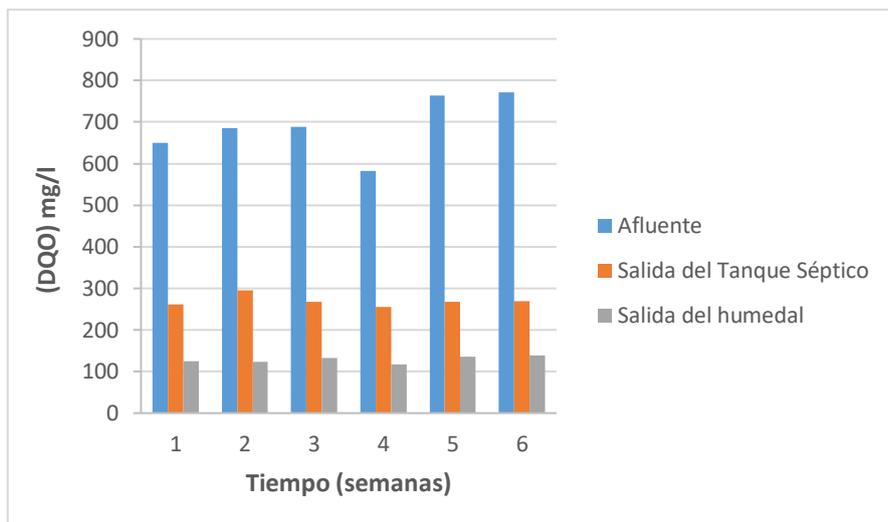


Figura 33: Variación de la DQO en el periodo de muestreo

Se obtuvo 81.38% de remoción total en el sistema integrado tanque séptico y humedal.

El porcentaje de remoción de la DQO en el tratamiento del tanque séptico fue de un 60.66%, estos valores son similares a los encontrados por Madera et al. (2005) que fueron de 57.2%.

En el humedal horizontal se obtuvo porcentajes de 52% con un tiempo de retención de 16.33 horas, señalando que el porcentaje de remoción es bajo comparado con la investigación de alcatraz como planta emergente en un pantano de tipo flujo horizontal de Figueroa (1999) que indica una eficiencia de remoción de 68% en la DQO, con un tiempo de retención de 2.5 días; mientras que Zurita et al. (2008) obtuvieron eficiencias del 79%, con un tiempo de retención de 4 días.

h) Nitrógeno Amoniacal

En el Figura 34 se observan los valores promedios de nitrógeno amoniacal, los cuales tienen un promedio en la salida del tanque séptico de 45.9 mg/l y salida del humedal de 35.7 mg/l. Teniendo una remoción de 22.8 % en el tratamiento secundario, siendo una buena eficiencia en el tratamiento (ver Anexo 3.2).

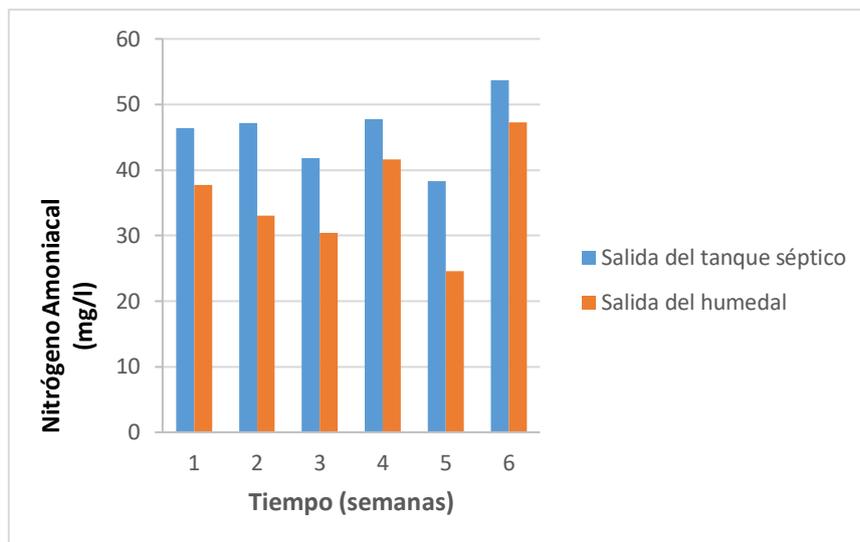


Figura 34: Variación del Nitrógeno amoniacal en el periodo de muestreo

“En los humedales horizontales puesto que la transferencia de oxígeno es baja y hay pocas zonas aeróbicas, la nitrificación no es destacable y el rendimiento de eliminación del amonio es alrededor del 30%” (Kadlec et al., 2000).

i) Nitrito

En el Figura 35 se observan los valores promedios de nitrito obteniendo un valor promedio de 4.93 mg/l a la salida del sistema integrado (ver Anexo 3.3).

No se espera nitrificación en el humedal de flujo horizontal porque al tener flujo continuo permanece inundado y se reducen los niveles de oxígeno en su interior.

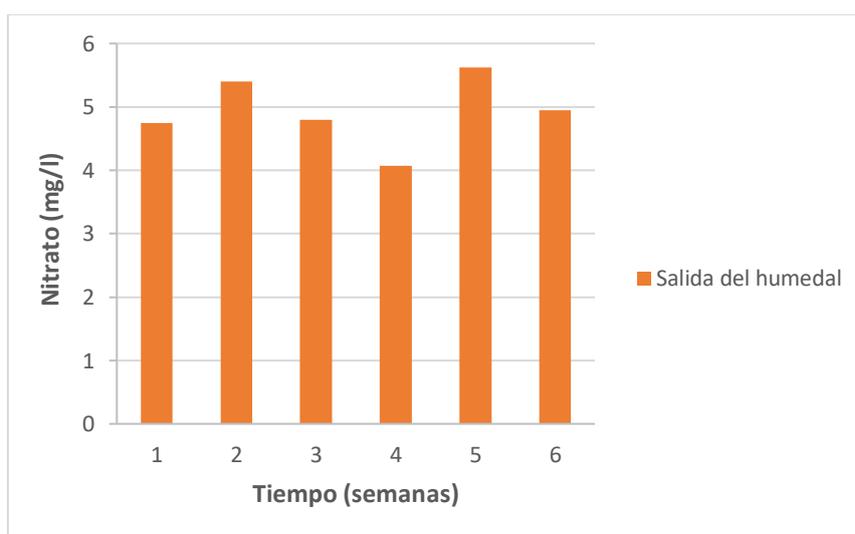


Figura 35: Valores de nitrito en el periodo de muestreo

j) Fosfato

Delgadillo et al. (2010) señalan que cerca del 25% del fósforo total en el agua residual doméstica está presente como ortofosfatos, disponible para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total.

En el Figura 36 se observan los valores promedios de fosfato; mostrando un valor en el afluente de 24.40 mg/l y en el efluente de 15.55 mg/l. Teniendo una eficiencia de remoción en todo el sistema del 36.21% (ver Anexo 3.4).

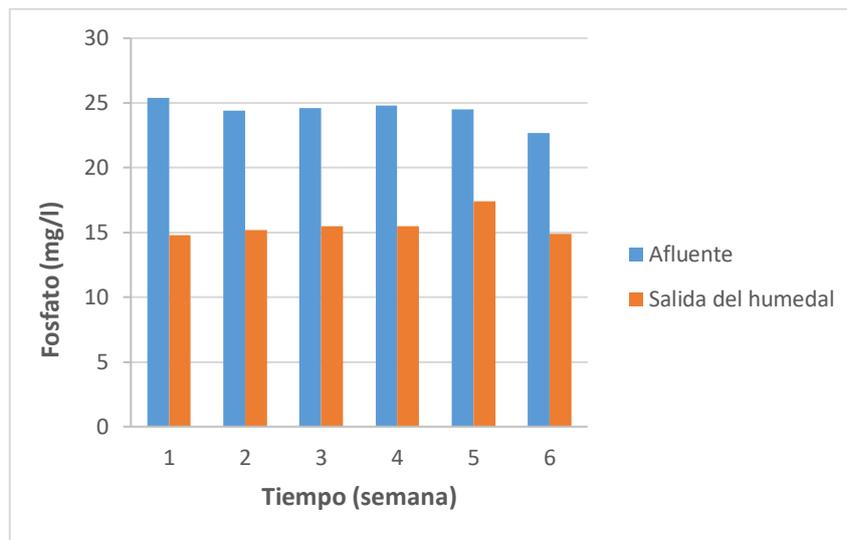


Figura 36: Variación del Fosfato en el periodo de muestreo

Los resultados del fosfato son similares a los parámetros de remoción que indica Romero (2008) para tanques sépticos que son del 15% para el fósforo y en eficiencias típicas de eliminación para humedales horizontales (tratamiento secundario), Günter et al., (2017) indican remociones del 10 – 20%.

k) Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En el Figura 37 se observan los valores promedios de sólidos suspendidos totales, los cuales tienen un promedio en el afluente de 491.7 mg/l, en la salida del tanque séptico de 62.7 mg/l y salida del humedal de 12.32 mg/l (ver Anexo 3.7).

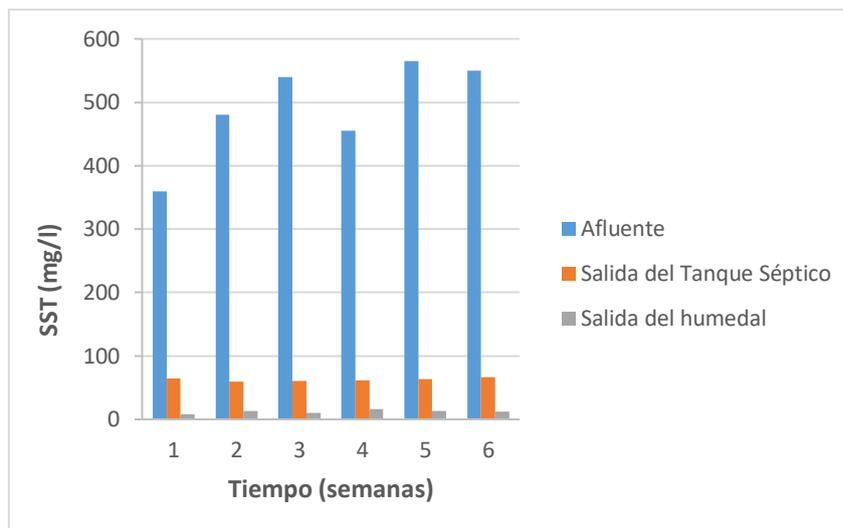


Figura 37: Variación de SST en el periodo de muestreo

Se obtuvo un total de remoción en el sistema integrado de 97.5%.

El porcentaje de remoción de los SST en el tratamiento del tanque séptico fue de un 87%, siendo un valor apreciable; SINIA (2017) indica porcentajes de remoción en el tanque séptico de SST de 50 a 70%.

El humedal horizontal obtuvo remociones del 80.25% con un tiempo de retención de 16.33 horas, similar a las encontradas por Zurita et al. (2008) que fueron de 80.17%, con un tiempo de retención de 4 días.

“Las eficiencias de eliminación típicas en las aguas residuales domésticas en sólidos suspendidos están entre 70 - 80%” (Von Sperling, 2007).

m) Coliformes Totales

En los humedales de flujo subsuperficial, la remoción de patógenos está sujeta a varias condiciones como lechos de poca profundidad y material fino, temperaturas del agua más calientes, o mayor tiempo de retención hidráulico (Wallace & Kadlec, 2009).

En la Figura 38 se observan los valores promedios obtenidos en la remoción de coliformes totales (ver Anexo 3.8).

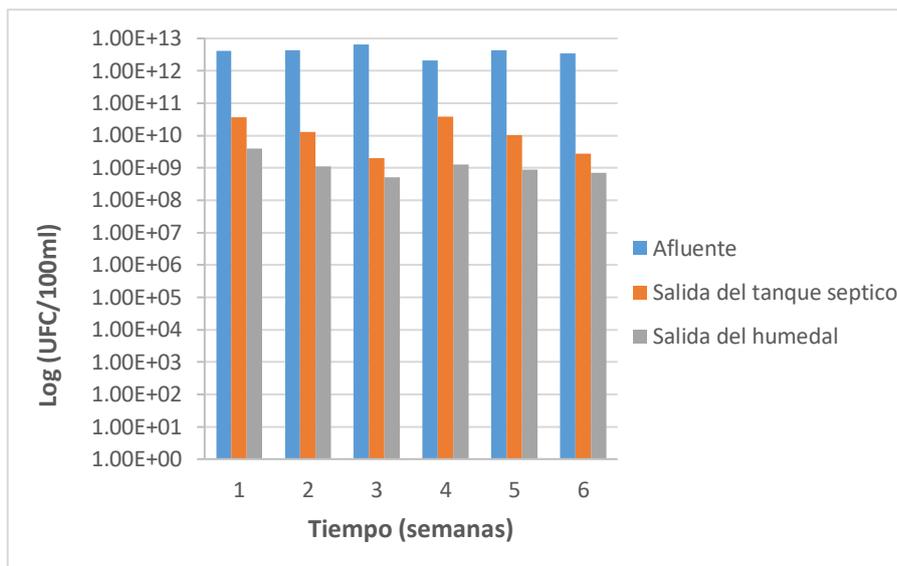


Figura 38: Variación de Coliformes totales en el periodo de muestreo

En el afluente se obtuvieron 12 unidades logarítmicas y a la salida del tanque séptico 10, logrando reducir 2 unidades logarítmicas, con un tiempo de retención de 11 horas, lo que concuerda con Rose et al. (1996) que señalan que los tratamientos primarios logran reducir 1-3 unidades logarítmicas.

En la salida del humedal se obtuvo una baja remoción de 1 unidad logarítmica, con un porcentaje del 86.4%; este es un valor reducido comparado con lo señalado por Zurita et al. (2006) que indican un 99.96% de remoción en coliformes totales con un tiempo de retención de 4 días y Günter et al. (2017) que señalan eficiencias típicas de eliminación de 2 unidades logarítmicas para humedales de flujo horizontal como tratamiento secundario. Dando a señalar que el tiempo de retención del humedal fue solo de 16.3 horas.

En la Tabla 20 se muestra el resumen de los valores promedios y porcentajes de remoción del monitoreo de la calidad de agua en el tratamiento primario, secundario y de todo el sistema integrado (tanque séptico y humedad).

Tabla 20: Resumen de los valores promedios y porcentajes de remoción del monitoreo de la calidad del agua

Parámetro	Promedios de las mediciones			Promedio del porcentaje de remoción		
	Afluente	Salida del Tanque Séptico	Salida del humedal	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario	Todo el sistema
Temperatura (°C)	22.03	22.22	22.57	-	-	-
Conductividad Eléctrica (us/cm)	1498.67	1440.33	1430	-	-	-
pH	7.87	7.36	7.21	-	-	-
Oxígeno Disuelto (mg/l)	0.14	0.13	0.3	-	-	-
Turbiedad (NTU)	262.2	87.08	27.58	65.2%	68.6%	89.5%
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	387.5	146.17	58.17	62.2%	60.0%	85.0%
Demanda Química de Oxígeno (mg/l)	690.17	269.5	128.5	60.7%	52.2%	81.4%
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	-	45.9	35.7	-	22.8%	-
Nitrato (mg/l)	-	-	4.93	-	-	-
Fosfato (mg/l)	24.4	-	15.55	-	-	36.2%
Sólidos Suspendidos totales (mg/l)	491.67	62.7	12.32	86.9%	80.3%	97.5%
Coliformes totales (NMP/100ml)	4.15E+12	2.60E+10	1.32E+0.9	99.4%	86.4%	99.97%

4.3 Evaluación del crecimiento de la especie vegetal:

a) Facilidad de crecimiento y altura de la planta:

Durante la investigación se sembraron en el humedal 49 rizomas de cala en el mes de marzo (T prom. 22.9 °C), en las primeras 3 semanas de haberlas plantado, solo 20 rizomas habían brotado; por ello y para favorecer su desarrollo se puso una malla raschel para darle sombra. Después de dos meses (finales del mes de Abril) 44 rizomas terminaron de brotar (en la Figura 39 se muestra los promedios mensuales de altura de las plantas).

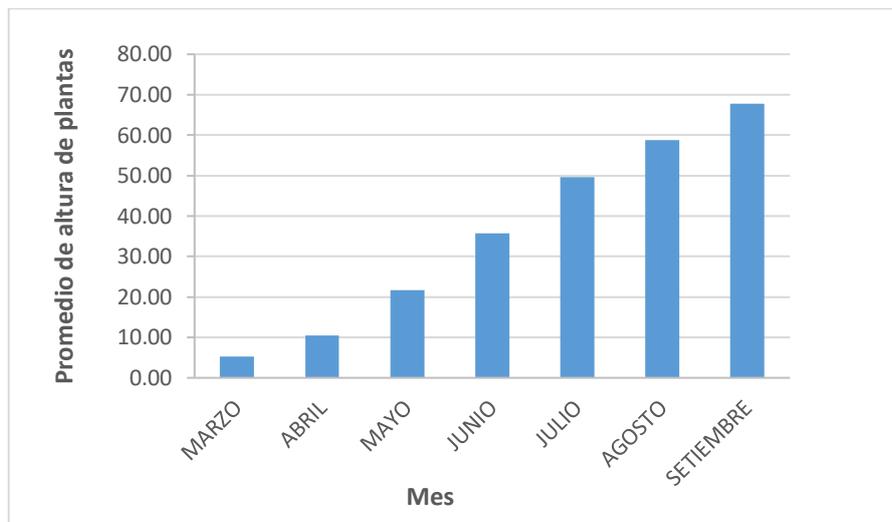


Figura 39: Promedio de crecimiento de plantas

La malla raschel se mantuvo durante los meses de Marzo a Mayo, en ese tiempo los rizomas llegaron a tener una altura promedio de 21.61 cm. Durante los meses de Junio a Setiembre se retiró la malla, y las plantas alcanzaron un altura promedio de 67.84 cm (final del mes de Setiembre) con una temperatura promedio de 16.26 °C.

Los datos muestran que se tuvo un crecimiento constante de las plantas en los meses de Abril, Mayo, Junio y Julio con crecimiento promedio de 13 cm por planta, mientras que en los meses de Agosto y Setiembre el promedio fue de 9 cm por planta.

Zurita et al. (2008) señalan en su estudio a la cala como planta emergente en humedales alcanzando alturas promedias de 50.2 ± 1.8 cm para humedal horizontal, siendo las plantas de 12 meses de edad con mayor altura que la de 7 meses edad, por lo que se puede señalar que las plantas se desarrollaron bien en el humedal horizontal, ya que se obtuvieron cifras mayores.

b) Plagas presentes:

En el mes de Junio (T prom. 16.21 °C) aparecieron moscas de humedad o Psychodidae. Carpoica (1996) indica que las Psychodidae conforman el grupo de los insectos de orden Díptero, debido a las características propias de la biología y ecología, se desarrollan en material de descomposición contaminado con múltiples microorganismos; para controlar esta plaga se pusieron 6 trampas, confeccionadas en plástico amarillo y untadas con melaza por ambas caras, esto permitió atraer las moscas. También se aplicó un insecticida casero que contenía ají, ajo y detergente, este se aplicó mediante pulverizador sobre las hojas de las plantas dos veces por semana.

Las moscas aparecieron cuando la temperatura descendió (estación de invierno), la plaga se controló después de las tres semanas de la aplicación del insecticida casero, volviendo aparecer a fines del mes de Agosto (T prom. 15.92 °C) pero en menor número. En el mes de Setiembre (T prom. 16.67 °C) no se necesitó echar insecticida ya que la cantidad de moscas se redujo.

c) Floración

La floración fue evaluada desde el mes de Julio (empezaron a florecer) hasta finales del mes de Setiembre, sin embargo, se estima que la floración duró hasta el mes de Diciembre; Soto (2014) señala que la cala blanca mantiene su parte aérea activa durante todo el año y florece desde final de invierno hasta la primavera.

Siendo la floración una señal de adaptación de la planta en el humedal horizontal, se contabilizó la cantidad de flores por hilera sembrada; el número promedio de flores se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21: Promedio de flores

Mes	Flores						
	Filas						
	1	2	3	4	5	6	7
Julio	1	3	2	3	3	4	4
Agosto	2	2	3	2	3	4	3
Setiembre	2	3	3	1	2	3	6
Suma total	5	8	8	6	8	11	13

Zurita et al. (2008) señala en su estudio que el número medio de brotes producidos por planta fue de 5.3 ± 0.8 en humedal horizontal, produciendo las plantas de 12 meses un mayor número de brotes con respecto a las 7 de meses edad. Sin embargo, existe poca información sobre el estado físico de la cala dentro de humedales de tratamiento.

La cantidad de brotes fue de 59 durante Julio – Setiembre, teniendo un promedio de 2.8 brotes por plantas, se puede señalar que los brotes emergentes fueron significativos por plantas, siendo estas de casi 6 meses de edad.

La fila que estuvo más cerca a la entrada de agua residual tuvo menor crecimiento de flores a comparación de las filas posteriores, siendo más productivas las de la última fila, esto ocurrió porque en la entrada del humedal se encontró mayor retención de sólidos entre el confitillo. Al no haber una buena circulación del agua en la grava, se generan daños al rizoma, haciendo que no tengan un buen desarrollo, y que se pudra.

Pato et al., (2007) indica que uno de los grandes problemas que se encuentran a la hora de realizar un cultivo de *Zantedeschia* es el producido por la bacteria *Erwinia carotovora*, causante de la podredumbre blanda del rizoma. Para poder mitigar esta enfermedad se realiza el cultivo sobre un buen drenaje y que aporte una buena relación de aire y agua.

d) Raíces

En la Tabla 22 se muestra el tamaño de raíces, al término del muestreo.

Tabla 22: Tamaño de raíces

Tamaño de raíces (cm)								
Filas	Columnas							Promedio (cm)
	1	2	3	4	5	6	7	
1	13	15	11	10	13	*	*	13.11
2	15	17	13	10	15	10	15	
3	20	*	15	10	15	15	8	
4	10	17	10	18	10	10	10	
5	14	15	11	16	13	12	*	
6	10	20	15	14	10	14	13	
7	12	17	15	12	11	*	8	

* No hubo crecimiento de plantas

Belmont & Metcalfe (2003) señalan que “las calas crecen bien en sustrato de roca triturada obteniendo raíces de aproximadamente 25 cm de largo, las plantas fueron trasplantadas al humedal cuando tenían 8 cm de alto, y se mantuvieron en un rango de temperatura de 14-20°C y 16 h de luz natural/artificial por día”.

Para esta investigación se midió el tamaño de raíces de las calas después de haber terminado con el muestreo. El promedio de tamaño de raíces fue de 13.11 cm, las raíces no obtuvieron un buen desarrollo, esto pudo deberse al tipo de tamaño del rizoma plantado, a las condiciones climáticas (T prom. de 15.92-22.9°C) o a un mal drenaje en el humedal.

4.4 Parámetros de operación del tanque séptico:

4.4.1. Tiempo de retención:

El tiempo de retención calculado fue de 11.30 horas, siendo este mayor al periodo de retención hidráulica del diseño del tanque séptico y el de la norma IS-020, que establece 6 horas como mínimo. Al analizar las eficiencias logradas con este tiempo de retención, se obtuvieron remociones del 62.1% DBO₅, 60.66% DQO y 86.94% SST, las cuales son superiores a los valores señalados por los autores USEPA (2002), Madera et al. (2005) y SINIA (2017).

CEPIS (2005) señala que los resultados dependen en gran medida del tiempo de retención, los dispositivos de entrada y salida y la frecuencia de extracción de lodos.

4.5 Parámetros de Operación del humedal horizontal:

4.5.1 Tiempo de retención:

En la Figura 40 se muestra la curva de variación de la concentración del trazador, la primera concentración tomada fue de 665 ppm, la máxima concentración salina fue de 976 ppm (ver Anexo 6.1).

El tiempo medio de residencia fue de 16.33 horas, que fue menor al tiempo de retención teórico de 23.3 horas.

Pérez (1992) indica que las condiciones hidráulicas del fluido (zonas muertas, corrientes de inercia, cortocircuitos hidráulicos, etc.) hacen imposible las condiciones de flujo estable, por lo que Ruiz (2010) señala que el tiempo de retención teórico no tiene que coincidir con el real.

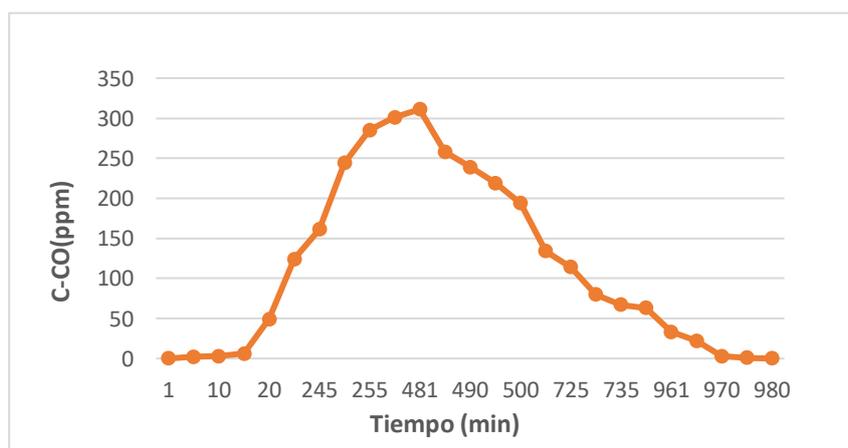


Figura 40: Curva de variación de la concentración del trazador

Los resultados del análisis de la curva (ver Anexo 6.2), indican que el humedal horizontal tiene un flujo no ideal, el cual presenta cortocircuitos hidráulicos.

Este fenómeno hace que parte del volumen del agua que ingresa al reactor salga rápidamente, sin permanecer almacenado en él (CEPIS,1992). Haciendo que el tiempo medio de residencia hallado con el trazador sea menor al teórico.

4.5.2 Carga hidráulica:

La carga hidráulica fue hallada en función a un caudal de 2.56 m³/día al ingreso del humedal y un área superficial de 15 m². El resultado fue de 0.17 m³/m².día, señalando que es similar a la carga aplicada por Romero (2004) que indica cargas hidráulicas de 0.047 a 0.187 m³/m².día para humedales de flujo subsuperficial, sin embargo, Lara y Vera (2005) registran experiencias en humedales subsuperficiales para el tratamiento de aguas residuales obteniendo una carga hidráulica de 0.23 m³/m².día.

4.5.3 Carga orgánica superficial:

La carga orgánica fue hallada en función al valor promedio de la DBO₅ con un valor de 146.17 mg/l en la entrada del humedal, 58.17 mg/l en la salida del humedal, 15 m² de área superficial y un caudal de 2.56 m³/día al ingreso del humedal, obteniendo un valor de 15 g DBO₅/m².día, siendo este un valor máximo dentro del rango de cargas orgánicas que deben variar entre 3 y 15 gDBO₅ /m² día, en humedales horizontales que se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (Morales et al., 2013).

Las eficiencias de remoción obtenidas en DBO y DQO fueron de 60.01% y 52.2%, respectivamente. Estos porcentajes podrían ser mayores, si la carga superficial aplicada en el humedal fuera menor, en tal caso el nuevo caudal aplicado debería ser menor al actual.

4.5.4 Determinación del área requerida por habitante equivalente:

En la Tabla 23 se muestra el resultado del área requerida por habitante equivalente.

Tabla 23: Área requerida por habitante equivalente

	Valores	Unidades
Caudal (Q)	2.56	m ³ /día
Valor de la DBO₅	146.17	mg/l
Aporte per cápita (AP)	50	g/hab.día
Habitante equivalente (PE)	7.48	hab.Eq
Área superficial (A)	15	m ²
Área requerida por habitante equivalente	2.00	m ² /PE

En la investigación se obtuvo un área de 2 m²/PE, menor al sugerido por Hoffmann et al. (2011) para humedales de flujo subsuperficial horizontal en climas calientes (3 m²/PE).

V. CONCLUSIONES

- El sistema integral tanque séptico – humedal es una opción para el tratamiento de aguas residuales domésticas, pues logra eficiencias de remoción del 89.5% en Turbiedad, 85% en DBO₅, 81.4% en DQO, 36.2% en Fosfato, 97.5% en Sólidos Suspendidos Totales y 99.97% en Coliformes Totales. Con estas eficiencias, el sistema integrado cumple con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para descargas de efluentes domésticos, a excepción de los coliformes totales que no son considerados en los LMP.
- La especie *Zantedeschia aethiopica* (cala), tuvo dificultades para desarrollarse en el humedal, fue atacada por plagas de insectos, requirió protección contra el sol, y tuvo una tasa de crecimiento de 4,6 plantas por m² de humedal, produciendo en promedio 2 flores/m² de humedal al mes; producción muy baja para pensar en una operación comercial.
- El tanque séptico operó con un caudal diario de 2,7 m³/día y un tiempo de retención teórico de 11,30 horas (mayor al mínimo de 6 h especificado en la Norma IS. 020); esta condición pudo influenciar en una mayor eficiencia de remoción de carga orgánica, removiéndose el 62% de la DBO vs los valores reportados en literatura que señalan de un 30 a 50%.
- El humedal de flujo horizontal operó con una carga hidráulica de 0,17 m³/m².día y una carga orgánica superficial de 15 g DBO/m².día, representando valores máximos aplicables a este tipo de humedales; lo que influyó en los bajos valores de eficiencia alcanzados: 60% en remoción de DBO, 52% en DQO, 80% en sólidos totales y 86,4 % en coliformes totales. Bajo estas condiciones de operación, el tiempo de retención teórico fue de 23.3 horas; y el área requerida por habitante equivalente fue de 2 m²/hab.eq.
- El tiempo de retención en el humedal, hallado con el trazador, fue de 16.33 horas, siendo menor al tiempo de retención teórico de 23.3 horas, lo que señala que el flujo de agua pasó más rápidamente dentro del humedal, por presencia de cortocircuitos, esto también influyó en la baja eficiencia mostrada.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la mejora de la eficiencia de remoción en el humedal de flujo horizontal con una reducción de la carga hidráulica de operación.
- Evaluar la producción de lodos en el tanque y plantear un modelo de gestión y disposición final de los lodos.
- Repetir la experiencia con otras especies vegetales con mayor desarrollo radicular, por ejemplo: *Cyperus alternifolius* (paragüitas).
- Debido al cumplimiento de Límites Máximos Permisibles, el sistema integrado podría ser utilizado como modelo para una PTAR en pequeños centros poblados, que cuenten con áreas para la construcción del humedal horizontal; y al cual se le incorpore un sistema de desinfección para alcanzar los LMP en coliformes termotolerantes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association, A. W. (1992). *Metodos Normalizados para el analisis de aguas potables y residuales*. España: Díaz de Santos, S. A.
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 17-24. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101302.pdf>
- Ávila de Navia SL y Estupiñan SM (2009). Calidad sanitaria del agua de la Ciénaga Mata de Palma en el Departamento del Cesar, Colombia. *NOVA*. 7(11):85-91.
- Bachoon DS, Markand S, Otero E, Perry G, Ramsubaugh A.(2010). Assessment of non-point sources of fecal pollution in coastal waters of Puerto Rico and Trinidad. *Marine Pollution Bulletin*; 60:1117–1121.
- Belmont, M., & Metcalfe, C. (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study. *Ecological Engineering*, 233-247.
- Belmont, M., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sanchez, A., & Metcalfe, C. (2004). Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central México. *Ecological Engineering*, 299-311.
- Beltran Beltran, T., & Campos Riveros, C. (2016). Universidad Nacional del Centro del Peru. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3461/Beltran%20Beltran-Campos%20Rivero.pdf?sequence=1>
- Boyer, J.A., and C.A. Rock. (1992). Performance of Septic Tanks. In *Proceedings*, ed. R.W. Seabloom, Seventh Northwest On-Site Wastewater Treatment Short Course and Equipment Exhibition, University of Washington, Seattle.
- Boehm A, Soller J.(2013). Recreational Water Risk: Pathogens and Fecal Indicators. In: Laws EA, editor. *Environmental Toxicology*: New York: Springer:441-59.
- Calvache, W., Chavez, M., Duran, C., Guaña, E., Imba, A., & Nazate, W. (2002). Tratamiento de aguas: Tratamiento primario y parámetros hidráulicos. *RECITELA*, 77.
- Centro de Información de Sanidad Ambiental del Instituto Asiático de Tecnología (1982). *Tanque séptico y sistemas sépticos*. Bangkok, Thailand.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (1992). *Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*. Lima.

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2005). Especificaciones Técnicas para el Diseño de Tanques Sépticos. Lima.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.
- Cubillo, A. (2001). Parámetros y Características de las Aguas Residuales. CEPIS. Lima, Perú.
- Del Pilar M, Ávila S, Mónica S, Gómez AC.(2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. NOVA - Publicación Científica. 3(4):1794-2470.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Díaz, M., Espitia, S., & Molina, F. (2002). Digestión Anaerobia. Bogotá: Unibiblos.
- Dole MJ. & Wilkins HF. (1999). Floriculture, principles and species. New Jersey, USA. Prentice Hall. 613 p.
- Drinan, J. & Whiting, N. (2001). CRC Press. Obtenido de Water & Wastewater Treatment a Guide for the Nonengineering Professional : www.crcpress.com
- Feachem, R; Bradley, D; Garelick, H; Mara, D. (1983). Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management (English). World Bank studies in water supply and sanitation, Nro. 3. New York.
- Fernández de la Mora, M. (2004). Fundacion Global Nature. Obtenido de Fitodepuracion en humedales. Conceptos generales: <https://fundacionglobalnature.org/>
- Fernández, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid: Elecé Industria Gráfica.
- Figuroa Gallegos, J. (1999). Evaluación Alcatraz (*Zantedeschia Aethiopica*) como Planta Emergente en un Pantano Tipo Flujo Horizontal de Subsuperficie para el Tratamiento de Aguas Residuales de una Granja Porcícola -Edición Única. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11285/569834>
- García. (2010). Efecto de la cepa bacteriana CAE-01 Y fumigación al suelo sobre la pudrición blanda en el cultivo de alcatraz en la perla, Veracruz, instituto de Horticultura, México.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Cataluña.
- Gomez Lordan, Y. (2017). Evaluacion de la eficiencia de humedales artificiales verticales empleando *Cyperus alternifolius* y *Chrysopogon zizanioides* para el tratamiento de aguas servidas. Lima.

- Gomez Posada, S. (2009). bdigital repositorio institucional UN. Obtenido de Absorcion de nutrientes de *Zantedeschia elliottiana* (Calla Lily) en diferentes estados fenologicos como punto de partida para la determinacion de requerimientos nutricionales del cultivo en condiciones del eje cafetero colombiano : www.bdigital.unal.edu.co/1662/1/7006004.2009.pdf
- Guaqueta Trading. (2015). Obtenido de <http://www.guaqueta.co/>
- Günter Langergraber, G., Pascal Molle, J., Jaume Puigagut, O., & von Sperling, M. (2017). Treatment Wetlands. En *Biological Wastewater Treatment Series* (pág. 172). London : IWA Publishing.
- Hernández, E. (2013). Guía básica del cultivo de alcatraz (*Zantedeschia* sp.) y nociones para su propagación. Veracruz.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2005). Anuario de Estadísticas Ambientales. Lima, Perú.
- Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). Open Access Publishing in European Networks. Obtenido de *Constructed Wetlands for Pollution Control*: <http://www.oopen.org/search?identifier=640696>
- Lara Borrero, J. (1999). Depuracion de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales . Barcelona .
- Lara, J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Barcelona.
- Lara, J., & Vera, I. (2005). Implantación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 47-63.
- Larrea Murrell, J., Rojas Badia, M., Romeu Alvarez, B., Rojas Hernandez, N., & Heydrich Peres, M. (2013). *Revista CENIC Ciencias Biológicas* . Obtenido de <https://revista.cnic.edu.cu/revistaCB/articulos/bacterias-indicadoras-de-contaminaci%C3%B3n-fecal-en-la-evaluaci%C3%B3n-de-la-calidad-de-las-aguas>
- Luby SP, Gupta SK, Sheikh MA, Johnston RB, Ram PK, Islam MS.(2008). Tubewell water quality and predictors of contamination in three flood-prone areas in Bangladesh. *Appl Microbiol*.105:1002–1008.
- Madera, CA; Silva, JP; Peña, MR. (2005). Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales subsuperficiales. Colombia.
- Maldonado, Y. A. (2005). Uso de Wetlands para el Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales Domésticas. Tesis para optar el Grado de Maestro en Tratamiento de Aguas y Reuso de Desechos. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Marin Montoya, J., & Correa Ramirez, J. (2010). Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira . Obtenido de Evaluación de la Remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guada angustifolia* Kunth:

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1801/6283M337.pdf?sequence=1>

- Méndez RI, San Pedro L, Castillo ER, Vázquez EB. (2010). Modelación del tiempo de conservación de muestras biológicas de agua. *Rev Int Contam. Ambient.* 26 (4):327-335.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. España : Impresos y Revistas, S.A.
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. 33-46.
- Moreno-Casasola, P., & Warner, B. (2009). Breviario para describir, observar y manejar humedales. Obtenido de http://www1.inecol.edu.mx/inecol/libros/Breviario_Humedales.pdf
- Normas Legales. (2010). Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. Lima, Perú.
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olgún, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Ciencia* , 70-82.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2017). *Aguas Residuales: El recurso desaprovechado*. Paris, Francia.
- Pato Folgoso, A., Condés Rodríguez, F., & Vicente Conesa, F. (2007). Ensayo de *Zantedeschia* Híbrida en perlita. Murcia: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia Consejería de Agricultura y Agua. Obtenido de <https://www.carm.es/web/integra.servlets.Blob>
- Pato Folgoso, A., Condés Rodríguez, L., & Vicente Conesa, F. (s.f.). infoAgro. Obtenido de Cultivo de *Zantedeschia* Híbrida en perlita: <https://www.infoagro.com/flores/flores/zantedeschia.htm>
- Pérez, J. M. (1992). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. *Manual de Evaluación, Tomo II*. Lima, Perú. CEPIS/OPS.
- Pizano De M, M. 1999. *Zantedeschia*. Calla Lily. Santa Fe de Bogota - Colombia: Hortitecnia.
- Quispe Humire, J. (2013). Repositorio UNAP. Obtenido de Propuesta metodológica para la evaluación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante lagunas de estabilización - Azangaro: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/5485/Quispe_Humire_Jorge_Luis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramalho. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Bogota: Reverte S.A.
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2006). *Instalaciones Sanitarias Norma IS.020 Tanque Séptico*. Perú.

- Roeleveld, K. K., & Zeeman, G. (2006). Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 24.
- Romero. (1999). *Potabilización del Agua*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería .
- Romero, J. A. (2005). *Calidad del agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rose, J., Dickson, L., Farrah, S., & Carnahan, R. (1996). Removal of pathogenic and indicator microorganisms by a full-scale water reclamation facility. *Water Research*, 2785-2797.
- Rubio, D., & Páez, J. (2009). Evaluación de los parámetros involucrados en la remoción de Cinc en humedales artificiales verticales. Bogotá.
- Ruíz Ríos, A. (2010). *Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del Parque Porcino de Ventanilla, mediante un sistema de biodigestión y manejo integral de residuos sólidos y líquidos*, Lima, Perú. Universitat Ramon Llull. Barcelona, España.
- Secretariado Alianza por el Agua. (2014). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Ideasmares.
- Sistema Nacional de Información Ambiental. (2017). Ministerio del Ambiente. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe>
- Soto de Paz, G. (2014). Server at recursos biblio. Obtenido de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/>
- Trejo-Téllez. (2013). El Alcatraz Blanco. *Revista Agroproductividad*, 6.
- United States Environmental Protection Agency. (Agosto de 1993). Obtenido de <https://www.epa.gov>
- United States, Environmental Protection Agency, Office of Water. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C.
- United States, Environmental Protection Agency, Office of Water. (February de 2002). *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*. Obtenido de <https://www.epa.gov>
- Viana Caicedo, D. (2015). Respuesta a la aplicación de fertilización química complementado con bioestimulantes foliares en el cultivo de Cartucho Blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en la zona de El Ángel, provincia del Carchi. Ecuador.
- Viana, D. (2015). Respuesta a la aplicación de fertilización química complementado con bioestimulantes foliares en el cultivo de Cartucho Blanco (*Zantedeschia aethiopica*) en la zona de El Ángel, provincia del Carchi. Ecuador.

- Von Sperling. (2007). IWA Publishing. Obtenido de Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402086.pdf>
- Von Sperling, M., & Lemos Chernicharo, C. (2005). Biological Wasterwater Treatment in Warm Climate Regions . London: IWA Publishing .
- Vyzmazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 48-65.
- Wallace, S., & Kadlec, R. (2009). Copyright Clearance Center . Obtenido de www.copyright.com
- Zurita, F., Belmont, M., De Anda, J., & Cervantes-Martinez, J. (2008). Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. Ecological Engineering, 110-118.
- Zurita, F., Belmont, M., White, R., & De Anda and J, J. (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. Water Science & Technology , 654-659.
- Zurita, F., de Anda, J., & Belmont, M. (2006). Performance of Laboratory-Scale Wetlands Planted with Tropical Ornamental Plants to Treat Domestic Wastewater. Water Quality Research Journal of Canada, 410-417.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Cálculos de diseño del sistema integrado

Anexo 1.1: Diseño del Tanque Séptico

Diseño del tanque séptico	
Población servida (habitantes)	75
Caudal de aporte unitario (L/hab. día)	40
Caudal de diseño (m³/día)	3.00
Largo (m)	3.60
Ancho (m)	1.20
Área superficial del tanque séptico (m²)	4.32
Tiempo de retención (días)	0.46
Tiempo de retención (horas)	11.0
Volumen del tanque séptico	
Volumen de sedimentación (Vs, en m³)	1.37
Volumen de natas (Vn, en m³)	0.70
Volumen de digestión y almacenamiento de lodos (Vd, en m³)	4.88
Volumen total (Vt, en m³)	6.95
Profundidad del tanque séptico	
Profundidad máxima de espuma sumergida (He, en m²)	0.16
Profundidad libre de espuma sumergida (Hes, en m)	0.10
Profundidad libre de lodo (Ho, en m)	0.30
Profundidad mínima requerida para la sedimentación (Hs, en m)	0.32
Profundidad de digestión y almacenamiento de lodos (Hd, en m)	1.13
Profundidad total (Ht, en m)	1.70

Anexo 1.2: Diseño del Humedal Horizontal

Diseño del humedal de flujo horizontal		
Caudal de diseño (m ³ /día)	3	
DBO5 de ingreso al humedal (mg/l)	150	
Material de relleno	Arena gravosa	
Conductividad hidráulica (Ks, en m ³ /m ² .día)	1000	
Porosidad de arena gravosa	38	
Pendiente asumida para el fondo del lecho (%)	1	
Cálculos de diseño		
Área transversal (At, en m ²)	0.3	
Área superficial (As, en m ²)	15	
Relación largo/ancho (2:1)	Largo (m)	5
	Ancho (m)	3
Tiempo de retención teórica	días	1.0
	horas	23.3

ANEXO 2: Resultados de evaluación de parámetros en campo

Anexo 2.1: Resultados de pH

pH				
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal
1	07/08/2018	8.01	7.45	7.27
2	14/08/2018	7.98	7.18	7.07
3	21/08/2018	7.76	7.32	7.25
4	28/08/2018	7.77	7.29	7.15
5	04/09/2018	7.99	7.39	7.26
6	11/09/2018	7.7	7.5	7.28
	Promedio	7.87	7.36	7.21
	CV%	1.77	1.58	1.17

Anexo 2.2: Resultados de Conductividad eléctrica

Conductividad Eléctrica (us/cm)				
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal
1	07/08/2018	1277	1243	1264
2	14/08/2018	1587	1541	1528
3	21/08/2018	1577	1535	1489
4	28/08/2018	1588	1485	1531
5	04/09/2018	1481	1445	1400
6	11/09/2018	1482	1393	1368
	Promedio	1498.67	1440.33	1430.00
	CV%	7.99	7.75	7.37

Anexo 2.3: Resultados de Oxígeno disuelto

Oxígeno disuelto (mg/l)				
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal
1	07/08/2018	0.16	0.14	0.29
2	14/08/2018	0.14	0.13	0.21
3	21/08/2018	0.15	0.14	0.35
4	28/08/2018	0.13	0.12	0.37
5	04/09/2018	0.14	0.12	0.28
6	11/09/2018	0.12	0.1	0.32
	Promedio	0.14	0.13	0.30
	CV%	10.10	12.13	18.84

ANEXO 3: Resultados de evaluación del sistema en el laboratorio

Anexo 3.1: Resultados de Turbiedad

Turbiedad (NTU)						
Semanas	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento primario	% de remoción del tratamiento secundario
1	07/08/2018	211.5	83.68	27.39	60.43	67.27
2	14/08/2018	208.1	89.45	29.24	57.02	67.31
3	21/08/2018	254.5	109.6	37.54	56.94	65.75
4	28/08/2018	256.2	82.43	26.29	67.83	68.11
5	04/09/2018	396.9	84.06	24.8	78.82	70.50
6	11/09/2018	246	73.26	20.23	70.22	72.39
	Promedio	262.20	87.08	27.58	65.21	68.55
	CV%	26.42	14.03	20.85	% de remoción en todo el sistema	89.48

Anexo 3.2: Resultados de Nitrógeno amoniacal

Nitrógeno Amoniacal				
Semana	Fecha	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento secundario
1	7/08/2018	46.4	37.7	18.75
2	14/08/2018	47.2	33	30.08
3	21/08/2018	41.8	30.4	27.27
4	28/08/2018	47.8	41.6	12.97
5	4/09/2018	38.3	24.6	35.77
6	11/09/2018	53.7	47.3	11.92
	Promedio	45.87	35.77	22.79
	CV%	11.58	22.78	

Anexo 3.3 Nitrato

Nitrato (mg/l)		
Semana	Fecha	Salida del humedal
1	07/08/2018	4.75
2	14/08/2018	5.4
3	21/08/2018	4.8
4	28/08/2018	4.07
5	04/09/2018	5.62
6	11/09/2018	4.95
	Promedio	4.93
	CV%	11.06

Anexo 3.4 Resultados de Fosfato

Fosfato (mg/l)				
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del humedal	% de remoción de todo el sistema
1	07/08/2018	25.4	14.8	41.73
2	14/08/2018	24.4	15.2	37.70
3	21/08/2018	24.6	15.5	36.99
4	28/08/2018	24.8	15.5	37.50
5	04/09/2018	24.5	17.4	28.98
6	11/09/2018	22.7	14.9	34.36
	Promedio	24.40	15.55	36.21
	CV%	3.71	6.12	

Anexo 3.5 Resultados de Demanda bioquímica de oxígeno

DBO (mg/l)						
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento primario	% de remoción del tratamiento secundario
1	07/08/2018	367	122	57	66.76	53.28
2	14/08/2018	398	158	59	60.30	62.66
3	21/08/2018	336	147	63	56.25	57.14
4	28/08/2018	379	144	48	62.01	66.67
5	04/09/2018	419	152	55	63.72	63.82
6	11/09/2018	426	154	67	63.85	56.49
	Promedio	387.50	146.17	58.17	62.15	60.01
	CV%	8.74	8.79	11.32	% de remoción en todo el sistema	84.99

Anexo 3.6 Resultados de Demanda química de oxígeno

DQO (mg/l)						
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento primario	% de remoción del tratamiento secundario
1	07/08/2018	650	262	125	59.69	52.29
2	14/08/2018	685	296	123	56.79	58.45
3	21/08/2018	688	267	133	61.19	50.19
4	28/08/2018	582	255	117	56.19	54.12
5	04/09/2018	764	268	135	64.92	49.63
6	11/09/2018	772	269	138	65.16	48.70
	Promedio	690.17	269.50	128.50	60.66	52.23
	CV%	10.35	5.19	6.30	% de remoción en todo el sistema	81.38

Anexo 3.7 Resultados de Sólidos suspendidos totales

Sólidos Suspendidos (mg/l)						
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento primario	% de remoción del tratamiento secundario
1	07/08/2018	360	65	8.57	81.94	86.81
2	14/08/2018	480	59	13.33	87.71	77.40
3	21/08/2018	540	60	10	88.89	83.33
4	28/08/2018	455	61	17	86.59	72.68
5	04/09/2018	565	64	13.3	88.67	79.17
6	11/09/2018	550	67	12	87.82	82.09
	Promedio	491.67	62.67	12.32	86.94	80.25
	CV%	15.74	5.01	23.10	% de remoción en todo el sistema	97.49

Anexo 3.8 Resultados de Coliformes totales

Coliformes totales (UFC/100ml)						
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal	% de remoción del tratamiento primario	% de remoción del tratamiento secundario
1	7/08/2018	4.1E+12	3.70E+10	4.00E+09	99.10	89.19
2	14/08/2018	4.4E+12	1.30E+10	1.10E+09	99.70	91.54
3	21/08/2018	6.60E+12	2.00E+09	5.00E+08	99.97	75.00
4	28/08/2018	2.09E+12	3.90E+10	1.28E+09	98.13	96.72
5	4/09/2018	4.30E+12	1.02E+10	9.00E+08	99.76	91.18
6	11/09/2018	3.40E+12	2.80E+09	7.12E+08	99.92	74.57
	Promedio	4.15E+12	1.733E+10	1.42E+09	99.43	86.37
	CV%	35.59	95.57	91.56	% de remoción en todo el sistema	99.97

ANEXO 4: Evaluación de las plantas

Anexo 4.1 Resultados de mediciones de altura de las plantas

Altura de las plantas (cm)									
Filas	Mes	Columnas							Promedio de altura de planta por mes
		1	2	3	4	5	6	7	
1	MARZO	3	*	*	*	2	*	*	5.20
2		7	8	*	*	*	*	*	
3		*	*	*	5	8	3	4	
4		3	*	*	*	*	*	4	
5		5	9	8	*	7	*	*	
6		*	7	2	*	*	4	*	
7		*	6	3	6	*	*	*	
1	ABRIL	12	3	4	5	8	*	*	10.40
2		16	27	5	*	4	7	5	
3		8	*	7	13	15	17	12	
4		12	23	*	15	5	4	11	
5		15	17	16	5	16	*	*	
6		6	14	9	7	3	13	7	
7		6	14	12	13	5	*	*	
1	MAYO	27	15	16	10	11	*	*	21.61
2		31	39	17	4	16	19	17	
3		28	*	19	27	29	29	27	
4		25	50	7	27	17	16	23	
5		30	31	33	17	33	5	*	
6		13	26	19	19	15	25	18	
7		20	27	28	23	19	*	4	
1	JUNIO	38	27	32	29	26	*	*	35.68
2		43	41	30	19	30	31	33	
3		44	*	31	40	41	41	39	
4		41	66	19	65	29	28	35	
5		45	46	45	33	45	17	*	
6		33	43	31	30	28	40	30	
7		36	43	40	39	32	*	16	
1	JULIO	51	39	47	48	43	*	*	49.66
2		52	57	42	38	49	43	48	
3		54	*	43	55	56	55	55	
4		53	79	31	78	48	47	53	
5		55	59	57	47	55	35	*	
6		43	55	45	45	43	55	45	
7		48	56	52	49	47	*	30	
1	AGOSTO	61	50	56	69	63	*	*	58.70
2		59	64	53	48	56	55	55	
3		63	*	53	66	63	65	62	
4		60	86	41	85	55	54	61	
5		62	66	67	57	62	42	*	
6		50	66	56	54	50	62	52	
7		55	65	61	60	54	*	39	
1	SETIEMBRE	70	59	66	78	72	*	*	67.84
2		68	73	62	57	65	64	64	
3		72	*	62	75	72	74	71	
4		69	90	57	90	64	63	70	
5		71	75	76	66	71	51	*	
6		59	75	70	63	59	71	61	
7		64	74	70	71	63	*	48	

* No crecieron plantas

ANEXO 5: Mediciones y datos de temperatura

Anexo 5.1 Resultados de temperatura registradas en campo

Temperatura (°C)				
Semana	Fecha	Afluente del sistema	Salida del tanque séptico	Salida del humedal
1	07/08/2018	19.9	19.9	19.4
2	14/08/2018	21.2	21.5	21.3
3	21/08/2018	21	20.9	20.5
4	28/08/2018	23.2	23.3	22.8
5	04/09/2018	23.9	24.9	29.6
6	11/09/2018	23	22.8	21.8
	Promedio	22.03	22.22	22.57
	CV%	7.06	8.13	16.10

Anexo 5.2 Resultados de temperatura registrados por la estación Von Humboldt durante el periodo de monitoreo (Marzo – Setiembre)

MARZO				ABRIL				MAYO			
Fecha	Temperatura promedio (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Fecha	Temperatura promedio (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Fecha	Temperatura promedio (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
01/03/2018	23.6	28.5	20.2	01/04/2018	22.3	27.9	17.6	01/05/2018	19.9	27.9	16.9
02/03/2018	23.0	27.9	18.3	02/04/2018	22.4	28.5	18.7	02/05/2018	21.0	27.9	16.4
03/03/2018	23.2	27.9	19.9	03/04/2018	22.3	28.7	17.6	03/05/2018	20.3	27.9	15.9
04/03/2018	23.1	27.9	20.1	04/04/2018	22.5	29	18.2	04/05/2018	18.3	27.9	15.6
05/03/2018	22.2	27.9	19.4	05/04/2018	22.2	27.9	17.3	05/05/2018	19.6	27.9	15.4
06/03/2018	22.2	27.9	18.8	06/04/2018	22.5	28.8	17.7	06/05/2018	20.3	27.9	16.1
07/03/2018	23.1	28.7	18.4	07/04/2018	22.3	27.9	17.6	07/05/2018	19.9	27.9	16
08/03/2018	23.8	29.3	18.5	08/04/2018	22.7	27.9	18.1	08/05/2018	20.8	27.9	16.4
09/03/2018	23.8	30	20	09/04/2018	22.4	27.9	18.1	09/05/2018	21.2	27.9	17.5
10/03/2018	23.2	28.6	18	10/04/2018	23.1	28.6	18.8	10/05/2018	20.2	27.9	16.4
11/03/2018	22.8	28.4	18.9	11/04/2018	21.7	27.9	16.6	11/05/2018	19.1	27.9	15.7
12/03/2018	22.2	27.9	19.6	12/04/2018	21.0	27.9	16.6	12/05/2018	18.6	27.9	15.8
13/03/2018	22.7	28.2	19.1	13/04/2018	21.0	27.9	16.8	13/05/2018	17.6	27.9	15.1
14/03/2018	23.0	30	18	14/04/2018	21.6	28.4	17.8	14/05/2018	19.4	27.9	14.3
15/03/2018	23.4	29.4	18.4	15/04/2018	21.7	28.1	17.5	15/05/2018	20.5	27.9	15.3
16/03/2018	24.0	29.6	20.3	16/04/2018	20.6	27.9	16.2	16/05/2018	20.2	27.9	16
17/03/2018	24.1	30.2	20.6	17/04/2018	21.6	27.9	16	17/05/2018	18.7	27.9	15
18/03/2018	23.8	29.3	20.7	18/04/2018	21.5	27.9	16.1	18/05/2018	17.5	27.9	14.1
19/03/2018	23.0	29.3	19.8	19/04/2018	20.7	27.9	16.1	19/05/2018	18.4	27.9	13.8
20/03/2018	22.8	28.5	19.6	20/04/2018	21.6	27.9	17.1	20/05/2018	18.8	27.9	14.7
21/03/2018	22.2	27.9	18.4	21/04/2018	22.2	27.9	17.3	21/05/2018	18.3	27.9	13.9
22/03/2018	22.1	27.9	18.4	22/04/2018	22.1	28.7	16.9	22/05/2018	17.8	27.9	13.7
23/03/2018	22.9	27.9	19.4	23/04/2018	22.3	27.9	16.3	23/05/2018	18.4	27.9	15.1
24/03/2018	23.4	29.1	19.5	24/04/2018	23.3	28.1	20	24/05/2018	18.5	27.9	15.9
25/03/2018	23.1	29.2	18.8	25/04/2018	22.4	27.9	19.4	25/05/2018	17.5	27.9	15.6
26/03/2018	22.78	28.7	18.4	26/04/2018	21.8	27.9	18.6	26/05/2018	17.6	27.9	14.6
27/03/2018	23.0	28.7	19.5	27/04/2018	21.9	27.9	17.7	27/05/2018	17.9	27.9	13.4
28/03/2018	23.0	29.8	18.1	28/04/2018	22.1	27.9	18.2	28/05/2018	16.6	27.9	12.6
29/03/2018	22.0	27.9	18.1	29/04/2018	21.0	27.9	17.9	29/05/2018	17.6	27.9	14
30/03/2018	21.5	27.9	17.3	30/04/2018	20.9	27.9	17.7	30/05/2018	16.8	27.9	13.5
31/03/2018	21.1	27.9	16.6					31/05/2018	16.7	27.9	14.7

JUNIO				JULIO				AGOSTO			
Fecha	Temperatur a promedio (°C)	Temperatur a maxima (°C)	Temperatur a minima (°C)	Fecha	Temperatur a promedio (°C)	Temperatur a maxima (°C)	Temperatur a minima (°C)	Fecha	Temperatur a promedio (°C)	Temperatur a maxima (°C)	Temperatur a minima (°C)
01/06/2018	16.5	27.9	13.7	01/07/2018	16.5	27.9	13.9	01/08/2018	16.7	27.9	14.3
02/06/2018	16.7	27.9	13.6	02/07/2018	16.9	27.9	14.1	02/08/2018	16.9	27.9	14.5
03/06/2018	17.1	27.9	13.3	03/07/2018	16.7	27.9	14.2	03/08/2018	15.3	27.9	14
04/06/2018	17.3	27.9	15.2	04/07/2018	15.9	27.9	13.8	04/08/2018	15.6	27.9	13.9
05/06/2018	16.6	27.9	15.5	05/07/2018	16.7	27.9	14.4	05/08/2018	15.8	27.9	14.1
06/06/2018	16.4	27.9	15.6	06/07/2018	16.0	27.9	14.5	06/08/2018	15.3	27.9	13.7
07/06/2018	16.6	27.9	15.3	07/07/2018	15.4	27.9	14.2	07/08/2018	15.4	27.9	13.6
08/06/2018	17.2	27.9	15.3	08/07/2018	16.0	27.9	14.2	08/08/2018	15.0	27.9	13.5
09/06/2018	16.3	27.9	15.3	09/07/2018	16.4	27.9	14.8	09/08/2018	15.4	27.9	13.8
10/06/2018	16.4	27.9	14.8	10/07/2018	16.1	27.9	14.6	10/08/2018	15.3	27.9	13.9
11/06/2018	16.1	27.9	14.9	11/07/2018	16.8	27.9	14.6	11/08/2018	15.2	27.9	13.7
12/06/2018	15.7	27.9	14.8	12/07/2018	16.9	27.9	14.2	12/08/2018	15.5	27.9	13.3
13/06/2018	16.1	27.9	14.5	13/07/2018	17.7	27.9	14.3	13/08/2018	15.7	27.9	14.4
14/06/2018	16.1	27.9	14.8	14/07/2018	16.6	27.9	14.9	14/08/2018	15.6	27.9	13.4
15/06/2018	15.6	27.9	14.4	15/07/2018	15.9	27.9	14.6	15/08/2018	16.8	27.9	12.4
16/06/2018	15.7	27.9	14.1	16/07/2018	16.1	27.9	14.4	16/08/2018	16.7	27.9	13.7
17/06/2018	15.6	27.9	14.7	17/07/2018	16.3	27.9	14.4	17/08/2018	16.9	27.9	14.8
18/06/2018	15.8	27.9	14.4	18/07/2018	15.9	27.9	14.2	18/08/2018	16.1	27.9	14.5
19/06/2018	15.4	27.9	14.1	19/07/2018	17.1	27.9	13.4	19/08/2018	15.3	27.9	12.1
20/06/2018	15.4	27.9	13.8	20/07/2018	16.6	27.9	15.2	20/08/2018	16.4	27.9	11.9
21/06/2018	16.5	27.9	14.1	21/07/2018	15.8	27.9	14.4	21/08/2018	15.4	27.9	12.1
22/06/2018	15.8	27.9	14.4	22/07/2018	16.0	27.9	14.8	22/08/2018	16.0	27.9	13.4
23/06/2018	16.1	27.9	14.8	23/07/2018	15.7	27.9	14.3	23/08/2018	15.1	27.9	13.5
24/06/2018	16.0	27.9	14.3	24/07/2018	16.0	27.9	14.4	24/08/2018	16.0	27.9	13.7
25/06/2018	16.9	27.9	14.2	25/07/2018	16.2	27.9	14.8	25/08/2018	16.4	27.9	14
26/06/2018	16.2	27.9	14.6	26/07/2018	15.7	27.9	14.2	26/08/2018	16.1	27.9	14.1
27/06/2018	15.8	27.9	13.9	27/07/2018	16.0	27.9	14.4	27/08/2018	16.6	27.9	13.8
28/06/2018	16.3	27.9	14.9	28/07/2018	15.5	27.9	14	28/08/2018	16.2	27.9	14
29/06/2018	16.2	27.9	13.9	29/07/2018	15.3	27.9	14	29/08/2018	16.0	27.9	14.3
30/06/2018	16.2	27.9	0.4	30/07/2018	16.0	27.9	13.9	30/08/2018	16.9	27.9	14.3
				31/07/2018	15.5	27.9	13.3	31/08/2018	15.9	27.9	14.2

SETIEMBRE			
Fecha	Temperatur a promedio (°C)	Temperatur a maxima (°C)	Temperatur a minima (°C)
01/09/2018	16.6	27.9	13.5
02/09/2018	16.2	27.9	12.6
03/09/2018	16.9	27.9	14.3
04/09/2018	16.4	27.9	12.9
05/09/2018	16.9	27.9	12.7
06/09/2018	16.5	27.9	11.6
07/09/2018	17.7	27.9	14.3
08/09/2018	17.5	27.9	14.8
09/09/2018	16.7	27.9	14.7
10/09/2018	16.0	27.9	14.5
11/09/2018	16.7	27.9	14.5
12/09/2018	16.2	27.9	13.5
13/09/2018	16.7	27.9	14
14/09/2018	16.1	27.9	14.2
15/09/2018	17.7	27.9	14.8
16/09/2018	16.6	27.9	14.4
17/09/2018	17.2	27.9	14
18/09/2018	16.2	27.9	14.5
19/09/2018	15.3	27.9	13.9
20/09/2018	15.6	27.9	13.6
21/09/2018	16.6	27.9	13.1
22/09/2018	17.3	27.9	13.4
23/09/2018	16.8	27.9	13.7
24/09/2018	16.6	27.9	14.2
25/09/2018	15.5	27.9	13.6
26/09/2018	16.8	27.9	13.6
27/09/2018	17.5	27.9	13
28/09/2018	17.1	27.9	14.2
29/09/2018	17.8	27.9	15.1
30/09/2018	17.9	27.9	13.9

ANEXO 6: Tiempo de retención

Anexo 6.1: Resultados del ensayo del trazador dentro del humedal horizontal

Tiempo (horas)	Tiempo (minutos)	t/t_0	Concentración	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	100-F(t)
0	0	0.000	665	0	0	0	0
0.017	1	0.001	665	0	0	0.00	100.00
0.083	5	0.003	667	2	2	0.07	99.93
0.167	10	0.007	668	3	5	0.17	99.83
0.250	15	0.010	671	6	11	0.38	99.62
0.333	20	0.014	714	49	60	2.06	97.94
4.017	241	0.167	789	124	184	6.32	93.68
4.083	245	0.170	826	161	345	11.84	88.16
4.167	250	0.174	909	244	589	20.22	79.78
4.250	255	0.177	950	285	874	30.00	70.00
4.333	260	0.181	966	301	1175	40.34	59.66
8.017	481	0.334	976	311	1486	51.01	48.99
8.083	485	0.337	923	258	1744	59.87	40.13
8.167	490	0.340	904	239	1983	68.07	31.93
8.250	495	0.344	884	219	2202	75.59	24.41
8.333	500	0.347	859	194	2396	82.25	17.75
12.017	721	0.501	799	134	2530	86.85	13.15
12.083	725	0.503	779	114	2644	90.77	9.23
12.167	730	0.507	745	80	2724	93.51	6.49
12.250	735	0.510	732	67	2791	95.81	4.19
12.333	740	0.514	728	63	2854	97.97	2.03
16.017	961	0.667	698	33	2887	99.11	0.89
16.083	965	0.670	687	22	2909	99.86	0.14
16.167	970	0.674	668	3	2912	99.97	0.03
16.250	975	0.677	666	1	2913	100.00	0.00
16.333	980	0.681	665	0	2913	100.00	0.00

Anexo 6.2: Resultados del análisis de la curva variación de la concentración del trazador

Relaciones de tiempos para el análisis de la curva de concentración del trazador.	
t_i/t_0	0.0139
t_m/t_0	0.6771
t_p/t_0	0.3340
t_c/t_0	0.1670
t_b/t_0	0.0334
e	0.0264

ANEXO 7: Galería de fotos



Anexo 7.1: Plantas al tercer mes de ser plantadas



Anexo 7.2: Vista del sistema integrado del proyecto con malla raschel



Anexo 7.3: Vista del humedal horizontal



Anexo 7.4: Vista del tanque séptico



Anexo 7.5: Vista del sistema al final del proyecto



Anexo 7.6: Trampa para moscas



Anexo 7.7: Planta de cala con su raíz



Anexo 7.8: Planta de cala con su raíz



Anexo 7.9: Recogiendo muestra



Anexo 7.10: Vista de turbiedad de las muestras (Afluente, salida del tanque séptico y salida del humedal)



Anexo 7.11: Ensayo para medir DBO₅



Anexo 7.12: Medición de DBO₅



Anexo 7.13: Medición de Nitrógeno total y Fosfato



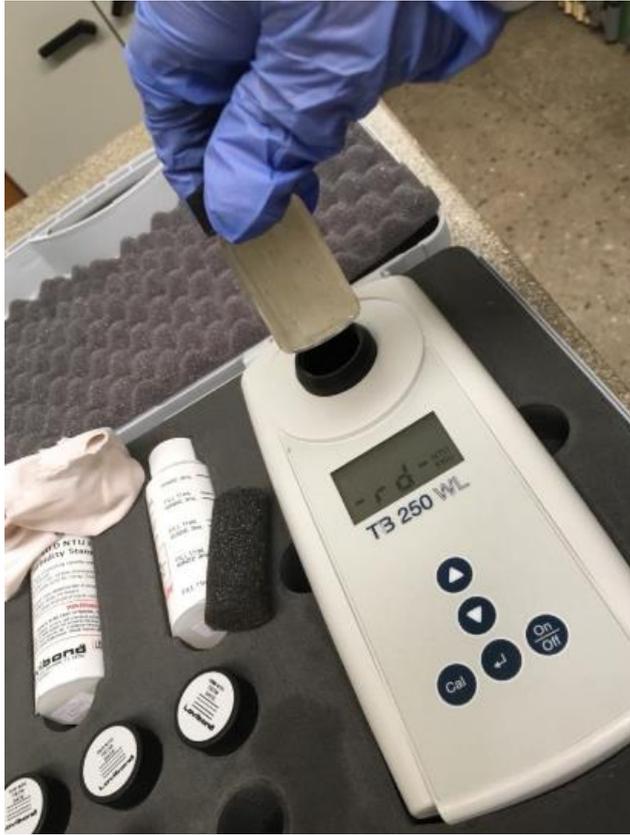
Anexo 7.14: Medición de Sólidos Suspendidos Totales



Anexo 7.15: Ensayo para medir Solidos Suspendidos Totales



Anexo 7.16: Ensayo para medir DQO



Anexo 7.17: Medición de turbiedad