

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño, construcción, operación y monitoreo de un sistema natural para el tratamiento secundario de agua residual utilizando un humedal de flujo subterráneo con plantas emergentes a nivel planta piloto.

Trabajo de graduación presentado por Sergio Enrique Bolaños López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química.

Guatemala
2013

Diseño, construcción, operación y monitoreo de un sistema natural para el tratamiento secundario de agua residual utilizando un humedal de flujo subterráneo con plantas emergentes a nivel planta piloto.

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería

Diseño, construcción, operación y monitoreo de un sistema natural para el tratamiento secundario de agua residual utilizando un humedal de flujo subterráneo con plantas emergentes a nivel planta piloto.

Trabajo de graduación presentado por Sergio Enrique Bolaños López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química.

Guatemala
2013

Vo. Bo

(f) 
Ing. María Isabel Aguilera

Tribunal Examinador.

(f) 
Ing. María Isabel Aguilera

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Cristián Rossi

Fecha de aprobación: Guatemala, 25 de Enero de 2013.

Índice

LISTA DE CUADROS	V
LISTA DE GRÁFICOS	VIII
LISTA DE IMÁGENES	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT.....	XI
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. ANTECEDENTES.....	25
IV. JUSTIFICACIONES	29
V. OBJETIVOS.....	30
VI. PROBLEMA A RESOLVER	31
VII. METODOLOGÍA	32
VIII. RESULTADOS.....	35
IX. DISCUSIÓN	49
X. CONCLUSIONES.....	55
XI. RECOMENDACIONES.....	57
XII. BIBLIOGRAFÍA.....	58
XIII. GLOSARIO	59
XIV. APÉNDICE	64
DATOS ORIGINALES.....	64
CÁLCULO DE MUESTRA	65
DATOS CALCULADOS.....	75
ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES.....	78
PLANOS	79
DATOS DE PLACA	83
COSTOS DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	84
MÉTODOS DE ANALISIS DE AGUA RESIDUAL	88
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	99
DESCRIPCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO	100
ARRANQUE DE SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	109
CALIBRACIÓN DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	110

LISTA DE CUADROS

Tabla 1: Área de humedal requerida para cada parámetro a tratar utilizando el método de Kadlec y Knight (1996).....	35
Tabla 2: Caudal de agua residual a tratar en humedal utilizando el método de Kadlec y Knight, (1996).	35
Tabla 3: Resultados de volumen de humedal, tiempo de retención hidráulica (TRH), carga hidráulica (CH) y cargas orgánicas superficiales (COS).	35
Tabla 4: Mediciones de pH en cada punto de muestreo.....	39
Tabla 5: Porcentaje de cambio de pH (aumento o disminución) para cada equipo.	39
Tabla 6: Valor promedio de pH para cada sistema y eficiencia global del sistema.	39
Tabla 7: Mediciones de SST en cada punto de muestreo.....	40
Tabla 8: Porcentaje de cambio de SST (aumento o disminución) para cada equipo.	41
Tabla 9: Valor promedio de SST para cada sistema y eficiencia global del sistema.	41
Tabla 10: Mediciones de nitratos en cada punto de muestreo.....	42
Tabla 11: Porcentaje de cambio de nitratos (aumento o disminución) para cada equipo.....	42
Tabla 12: Valor promedio de nitratos para cada sistema y eficiencia global del sistema.	43
Tabla 13: Mediciones de fosfatos en cada punto de muestreo.	44
Tabla 14: Porcentaje de cambio de fosfatos (aumento o disminución) para cada equipo.....	44
Tabla 15. Valor promedio de fosfatos para cada sistema y eficiencia global del sistema.	44
Tabla 16. Mediciones de conductividad en cada punto de muestreo.	45
Tabla 17: Porcentaje de cambio de conductividad (aumento o disminución) para cada equipo.	45
Tabla 18. Valor promedio de conductividad para cada sistema y eficiencia global del sistema.....	46
Tabla 19: Mediciones de DBO ₅ en cada punto de muestreo.....	46
Tabla 20: Porcentaje de cambio de DBO ₅ (aumento o disminución) para cada equipo.	47
Tabla 21: Valor promedio de DBO ₅ para cada sistema y eficiencia global del sistema.	47
Tabla 22: Costos de material, equipo e instalación del sistema de tratamiento de agua residual.....	48
Tabla 23: Valores utilizados para el cálculo de coeficiente de fricción f utilizando el método de Moody.	64
Tabla 24: Resultados de DBO inicial y DBO final y diluciones para cálculo de DBO ₅ para el día de operación 14.	64

Tabla 25: Resultados de DBO inicial y DBO final y diluciones para cálculo de DBO5 para el día de operación 21.	64
Tabla 26: Datos para cálculo de cabeza de bomba.	67
Tabla 27: Cargas máximas de DBO y SST para un biofiltro con aire y sin aire. (Basado en investigaciones previas en el IMTA de México).	69
Tabla 28: Capacidad máxima de agua residual a tratar en biofiltro según los parámetros de DBO y SST para un sistema con aire y sin aire.	70
Tabla 29: Caudal máximo permitido en biofiltro según los parámetros de DBO y SST en un sistema con aire y sin aire.	70
Tabla 30: Concentraciones de cada parámetro en la entrada al humedal y salida del humedal y porcentaje (%) de remoción de contaminantes esperado por el humedal.	70
Tabla 31: Ecuaciones de regresión y constantes de primer orden para el dimensionamiento de humedales (Rousseaus, 2003)	71
Tabla 32 : Área de humedal requerida para cada parámetro a tratar.	72
Tabla 33: Resultados de caudal obtenido en biofiltro (L/día) y con un 50% de sobredimensionamiento.	72
Tabla 34: Caudal de agua residual a tratar en humedal utilizando el Método de Kadlec.	73
Tabla 35: Número de velocidad de cabeza (k) y diámetro de tubería equivalente para válvulas y accesorios.	75
Tabla 36: Resultados para dimensionamiento de bomba centrífuga.	75
Tabla 37: Resultados de trabajo efectuado por la bomba y la potencia necesaria del motor.	75
Tabla 38: Capacidad máxima de agua residual a tratar en biofiltro según los parámetros de DBO y SST para un sistema con aire y sin aire.	75
Tabla 39: Caudal máximo permitido en biofiltro según los parámetros de DBO y SST en un sistema con aire y sin aire.	76
Tabla 40: Ecuaciones de regresión y constantes de primer orden para el dimensionamiento de humedales de flujo subsuperficial. (Rousseaus, 2003)	76
Tabla 41: Concentraciones de cada parámetro en la entrada al humedal y salida del humedal y porcentaje (%) de remoción de contaminantes esperado.	76
Tabla 42: Área de humedal requerida para cada uno de los parámetros a tratar.	76
Tabla 43: Resultados de caudal obtenido en biofiltro (L/día) y con un 50% de sobredimensionamiento.	77
Tabla 44: Resultados de caudal de agua residual a tratar en humedal de flujo subterráneo utilizando el método de Kadlec.	77
Tabla 45: Resultados de volumen de humedal, tiempo de retención hidráulica (TRH), carga hidráulica (CH) y cargas orgánicas superficiales (COS) para diseño de sistema	77
Tabla 46: Datos de placa de equipo.	83
Tabla 47: Costos de material y equipo para conexiones a procesos.	84
Tabla 48: Costos de material y equipo para fosas sépticas	84
Tabla 49: Costos de material y equipo para biofiltro de lecho orgánico.	85
Tabla 50: Costos de material y equipo para humedales de flujo subsuperficial	85

Tabla 51: Costos de material y equipo para conexiones eléctricas	86
Tabla 52: Costos de material y equipo para instalaciones de bomba centrífuga.....	86
Tabla 53: Costo de mano de obra con prestaciones de ley incluidas.....	87
Tabla 54: Métodos de análisis de agua residual.....	88
Tabla 55: Cronograma de actividades	99
Tabla 56: Resultados para calibración de caudal de humedales.....	110

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1: pH obtenido para cada punto de muestreo.....	40
Gráfica 2: SST obtenido para cada número de muestra.....	42
Gráfica 3: Concentración de nitratos obtenidos para cada muestra.....	43
Gráfica 4: Concentración de fosfatos obtenido para cada muestra.....	45
Gráfica 5: Conductividad obtenida para cada muestra.	46
Gráfica 6: DBO ₅ obtenida para cada muestra.....	48

LISTA DE IMÁGENES

Imagen1: Rejillas para un pre tratamiento de agua residual	8
Imagen2: Humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	20
Imagen3: Humedal de flujo vertical.....	22
Imagen4: Biofiltro de lecho orgánico.....	24
Imagen5 : Planos de distribución de área recreativa del Edificio de Los Cole- gios Profesionales	28
Imagen 6: Diagrama de bloques de proceso de tratamiento de agua resi- dual	36
Imagen 7: Diagrama de proceso de tratamiento de agua residual	37
Imagen 8 : Planos de distribución de área recreativa del edificio de los Cole- gios Profesionales	79
Imagen 9:Plano de distribución sistema de tratamiento de agua residual.....	80
Imagen 10: Planos instalaciones hidrosanitarias de sistema de trata- miento de agua residual	81
Imagen 11: Planos instalaciones eléctricas de sistema de tratamiento de agua residual.....	82
Imagen 12:Ciclo del fósforo.	97
Imagen 13: Vista satelital del terreno donde se localiza el sistema de tratamiento de agua.	101
Imagen 14: Análisis de área de trabajo.....	101
Imagen 15: Ajustes de tanque cúbico para humedal de flujo subsuperficial.....	102
Imagen 16: Fundiciones para instalación de equipo	102
Imagen 17: Arreglo de tubería de PVC de ½ “en cajas de registro	103
Imagen 18: Instalación de tubería de PVC ½ “.....	103
Imagen 19: Conexiones a proceso para humedales.	104
Imagen 20: Arreglo e Instalación de bomba centrífuga 0.5 hp Starite.....	104
Imagen 21: Instalaciones eléctricas para bomba centrífuga.	105
Imagen 22: Llenado de biofiltro con material filtrante (ficus).....	105
Imagen 23: Llenado de humedales con piedra de diferente gravimetría.	106
Imagen 24: Llenado de humedales con piedra de diferente gravimetría por cubeteo.	106
Imagen 25: Limpieza de piedrín dentro de un humedal.	108
Imagen 26: Limpieza de piedrín dentro de un humedal.	108
Imagen 27: Siembra de plantas en ambos humedales.	109
Imagen 28: Calibración de caudal en humedal utilizando probeta de 25 ml.....	110

RESUMEN

El uso inadecuado del agua conducen a la necesidad de tratar el agua, por lo que se desarrolló un sistema de tratamiento de agua residual a escala planta piloto, mediante la combinación de dos tecnologías de bajo costo: Biofiltración sobre lecho orgánico y humedales de flujo subterráneo con plantas emergentes.

Los cálculos de diseño para el biofiltro indicaron que se debía de trabajar con un caudal teórico de 3.35 L/día, pero el sistema se calibró para trabajar a 16.48 L/día, debido a la dificultad de regular flujos pequeños y la disposición del equipo utilizado. En base al diseño y capacidad de la planta, se construyó el sistema con tubería y accesorios de PVC de 0.0127 m (1/2 "). Se instalaron: 2 humedales de flujo sub superficial con plantas emergentes, 1 biofiltro de lecho orgánico, 1 fosa séptica, 1 bomba centrífuga de 0.37 kW (0.5 HP) marca StaRite 110V y 1 bomba dosificadora PULSATRON 115V. Para el biofiltro, se empleó madera de desecho Ficus, mientras que las plantas utilizadas en ambos humedales fueron cartucho blanco (*Zantedeschiaaethiopica*) y cola de caballo. (*Equisetum arvense* L).

Durante el diseño y dimensionamiento de los humedales, se determinó el área de humedal requerida a partir de datos teóricos de contaminantes de agua residual, siendo de 0.002 m² para SST. El caudal de agua residual posible a tratar por parte de cada humedal es de 5.287 m³/ día (5287. 78 L/día). Sin embargo, el biofiltro trata el agua antes de entrar al humedal, y éste soporta menos caudal debido a su dimensionamiento. Por lo tanto se trabajó con 0.01648 m³/ día (16.48 L/día). El tiempo de retención hidráulica del cada humedal con el caudal empleadores de 14.63 días. La carga hidráulica de cada humedal es de 1.7409 m/día y las cargas orgánicas superficiales de cada humedal son de 0.7851 kg DBO/m^{2*} día respecto a los parámetro de DBO determinados.

En cuanto a la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales hasta el día 63 de operación, se obtuvo un porcentaje de remoción promedio global de 96%. El pH del agua disminuyó 2%, teniendo el valor más cercano a un pH neutro de 7 en el día de operación 14, la demanda bioquímica de oxígeno promedio global disminuyó en un 84% hasta el día 63y la remoción de nitratos y fosfatos promedio global en el sistema fue de 96% y 59% respectivamente.

ABSTRACT

The problem of inappropriate use of water and high concentrations of pollutant discharge into rivers, lakes and water sources, have to develop a system of wastewater treatment pilot plant by combining two low-cost technologies: Organic Bed Biofiltration on groundwater flow and wetlands with emergent plants.

The design calculations indicate that the biofilter must work with a theoretical volume of 3.35 L / day, but the system was calibrated to operate at 0.01648 m³/ día (16.48 L / day), due to the difficulty of regulating small flows and the equipment. Based on the design and capacity of the plant, the system was constructed with 0.0127 m (1/2 ") diameter PVC pipe and fittings, and the equipment used was: 2 subsurface flow wetland, 1biofilter, one septic tank, one centrifugal pump 0.5 HP brand Starite metering pump 110V. For the biofilter was used scrap wood Ficus, while plants were used in both wetlands "Cartucho Blanco" (*Zantedeschiaaethiopica*) and "Cola de caballo"(*Equisetum arvense L*).

During the design and sizing of the treatment system, we determined the required wetland area, depending on the parameter of SST, which is 0.011 m². The wastewater flow possible by treating each subsurface flow wetland is 5.287 m³/ día 5287. 78 L / day. However, it was used 0.01648 m³/ día (16.48 L / day) because is the maximum flow that supports the biofilter. The hydraulic retention time of each subsurface flow wetland is 14.63 days. The hydraulic loading of each wetland is 1.7409 m / day. Organic fillers surface of each wetland is 0.7851 DBO/m² kg * day regarding certain BOD parameter.

As for contaminant removal efficiency until day 63 of operation, there was anoverall percentage of total suspended solids removal of 96% overall while the system was stabilizing. Water pH decreased 2%, with the value closest to a neutral pH of 7 in the day 14, the overall biochemical oxygen demand decreased by 84% and the removal of nitrates and phosphates in the system overall was 96% and 59% respectively.

I. INTRODUCCIÓN

Guatemala cuenta con un gran sistema hídrico, 18 ríos principales provenientes de las partes altas de los volcanes, logrando así cubrir la demanda de consumo de agua de la mayor parte de la población. Sin embargo, el mal manejo del recurso y la alta densidad de población en algunos sectores del país hacen que un alto porcentaje de la población no tenga acceso al líquido vital.

A lo largo de todo el país, prevalece la contaminación del agua superficial y de aguas subterráneas poco profundas debido a las aguas residuales provenientes del sector doméstico, industrial y agrícola. Actualmente, existen numerosas plantas de tratamiento de aguas negras, sin embargo, la mayor parte de éstas no están operando, ya que son abandonadas por las autoridades o personas a cargo o simplemente no se les da el mantenimiento y seguimiento que requieren debido a los altos costos que esto conlleva. Como resultado, el agua superficial (ríos y lagos) está contaminada de heces, residuos industriales y materiales no biodegradables siendo no apta para usarse en el suministro de agua.

El problema de escasez de agua, el uso inadecuado que se ha dado en los últimos años, tanto por la industria nacional como por pequeños consumidores, y los índices altos de partículas contaminantes en los mantos de agua que aún existen, hacen que sea necesario el tratamiento del agua residual. Este tratamiento en la mayoría de ocasiones resulta ser costoso y con equipos difíciles de operar, por lo que en los últimos años el tratamiento por sistemas naturales ha tomado una mayor importancia.

Los sistemas naturales son aquellos que utilizan mecanismos y procesos naturales para la eliminación de sustancias contaminantes de las aguas residuales. En algunos casos, estos sistemas no requieren de energía externa ni aditivos químicos, haciendo del proceso algo económicamente viable y con equipos que no dependen de otros factores contaminantes con el medio ambiente para poder operar. Siempre existe una interacción adecuada entre el medio ambiente y el sistema natural de tratamiento.

Entre los sistemas naturales más utilizados se encuentran los humedales construidos. En estos sistemas de depuración existe una interacción entre sustratos sólidos, microorganismos, agua y un medio de vegetación, el cual es el encargado de crear microambientes aeróbicos logrando que la degradación aeróbica de la materia orgánica sea más eficiente. Además las plantas se encargan de absorber nutrientes como Nitrógeno y Fósforo y amortiguan variaciones ambientales como cambios de temperatura que pueden afectar el proceso de degradación.

Durante este trabajo de investigación, se construyó un tren de tratamiento de agua residual, el cual consiste en tratar agua de una caja de registro proveniente de los sanitarios del edificio de Colegio de Profesionales de Guatemala. Se realizará un tratamiento primario utilizando una fosa séptica, con el fin de evitar que grasas, aceites y sólidos suspendidos ingresen a la siguiente etapa. Para el tratamiento secundario, primero se utilizará un biofiltro de lecho orgánico a escala laboratorio con tres diferentes capas. La primera será piedrín para dar soporte al material filtrante, la segunda será el material filtrante (trozos de madera del árbol de ficus) y la tercera capa de viruta de madera, el cual se encargará de distribuir el agua residual por todo el material filtrante. Al salir del biofiltro, se dará un segundo tratamiento secundario a partir de un humedal construido de flujo subsuperficial con plantas emergentes.

Durante el proyecto se espera obtener un porcentaje de remoción de contaminantes por encima del 90% para parámetros como DBO, DQO, SST y CF y por encima de 60% para el nitrógeno y fósforo, así como evaluar las condiciones económicas a las que opera el sistema natural y los efectos de contaminación que pueda producir; demostrando así que los sistemas naturales son una de las opciones más económica y amigable con el medio ambiente para el tratamiento de agua residual.

El trabajo escrito consta de un resumen, en el cual se presentan los resultados y conclusiones más importantes del trabajo de investigación. El índice muestra la numeración de cada parte del reporte para que se tenga una mejor ubicación de los temas de interés. El marco teórico es una revisión bibliográfica en la cual se muestran los fundamentos teóricos del trabajo de investigación, así como el funcionamiento de los equipos a utilizar. Una sección de antecedentes, donde se describen investigaciones previas y la situación en el Edificio de Los Colegios

Profesionales. Una sección de Justificaciones y de Problema a Resolver, donde se indica el motivo del trabajo de investigación y cuáles son los problemas que se deben de solucionar durante el mismo. Los objetivos del trabajo de graduación los cuales se dividen en general y específicos. Una sección de resultados donde se muestran los valores finales del trabajo de investigación obtenidos a partir de los cálculos realizados y los análisis utilizando el equipo HATCH. En la discusión se analizan, comparan e interpretan los resultados obtenidos, se determinan las posibles fuentes de error y como fue el comportamiento de las variables de operación en el sistema de tratamiento de agua. En las conclusiones se enlistan los resultados más significativos del trabajo de investigación. En el apartado de recomendaciones se presentan observaciones para la mejora del proyecto y como pueden influir más en las comunidades guatemaltecas. En la bibliografía, se listan los textos y fuentes consultadas durante todo el desarrollo de la investigación. El glosario, el cual incluye varios términos importantes con sus respectivas definiciones.

El apéndice está compuesto por una sección de datos originales, cálculo de muestra y los datos calculados, tanto del equipo utilizado como del dimensionamiento y bases de diseño de todo el sistema. Una sección de Planos, donde se muestran todos los planos del terreno y de la ubicación del sistema en el edificio de los Colegios Profesionales. Una sección de Datos de Placa de las dos bombas empleadas. Una sección de Costos del Sistema de Tratamiento donde se tiene una tabla con los costos de todo el sistema. Una sección de Métodos de Análisis de agua residual. Una breve descripción de todo el sistema de tratamiento según cada etapa, y finalmente la descripción del arranque del sistema y la calibración para los humedales de flujo subsuperficial.

II. MARCO TEÓRICO

A. Aspectos conceptuales.

1. Agua.

<<Cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquido incoloro, insípido, en pequeña cantidad, incoloro y verdoso en grandes masas que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y es más o menos puro. Forma la lluvia, las fuentes y los mares >>. (Diccionario técnico del agua, 1975)

Guatemala es una de las regiones privilegiadas del planeta donde el agua es relativamente abundante. Esta abundancia, sin embargo, ha sido la causa de nuestro poco interés en cuidarla y preservarla para las futuras generaciones, por lo cual se hace necesario el uso de tecnologías convencionales y sistemas naturales para el tratamiento del agua residual. (López, I. 2006)

2. Uso del agua en Guatemala. Según el uso que se le dé al agua, ésta puede clasificarse en:

- Uso doméstico
 - Bebida
 - Higiene personal
 - Higiene de la vivienda
 - Medio para la eliminación de residuos.
- Comercial
 - Higiene
 - Vía de comunicación
- Industrial
 - Fuente de energía
 - Uso en diversos productos manufacturados
 - Como elemento auxiliar de fabricación.
 - Como refrigerante o transportador de calor

- Agrícola
 - Riego
 - Lavado de terrenos

- Público.
 - Demanda de incendios
 - Higiene de poblaciones.

3. Agua potable

<<Son aquellas cuyas condiciones físicas, químicas y caracteres microbiológicos no sobrepasan ninguno de los límites establecidos como máximos o tolerantes. >> (Diccionario técnico del agua, 1975)

En Guatemala, no todas las comunidades que tienen la oportunidad de contar con agua, es potable, por lo que las personas que si cuentan con el líquido vital deben darle el mejor uso y en qué caso que sea posible darle el tratamiento a los residuos para su reutilización.

4. Depósito de agua

<<Es un lago, laguna, embalse, tanque, estanque, etc. de origen natural o artificial, utilizado para almacenamiento, regulación y control del agua. >> (Diccionario técnico del agua, 1975)

En Guatemala, por lo general se enfrentan problemas con el agua, ya que en muchos hogares no se cuenta con un servicio regular de tan vital líquido, por la desigualdad existente, por lo cual muchas personas se ven en la necesidad de conservarla en depósitos o recipientes para su uso diario, no obstante lo hacen inadecuadamente. (López, I. 2006)

B. Problemática de agua en Guatemala.

En Guatemala, el problema del agua no solamente es la escasez, sino que el precio el cual se ha incrementado en los últimos años. Así mismo, la población no

tiene una conciencia clara de la realidad sobre la necesidad de cuidar este servicio, para poder aprovecharlos y tomar medidas para evitar su desperdicio. Estos son factores que deben tomarse en cuenta para prevenir un colapso del sistema del servicio del agua a mediano plazo.

En nuestro país, el problema se acrecienta por carecer de una cultura preventiva de las entidades encargadas, ya que se acostumbra a actuar cuando el problema está presente y no cuando puede prevenirse. (López, I. 2006)

Actualmente, el problema del agua en Guatemala empieza a manifestarse en forma alarmante. La Empresa Municipal del Agua (EMPAGUA) informó recientemente que implementará un plan de contingencia debido a la escasez, contemplando un plan de racionamiento en la distribución del agua para el actual año; ya que como consecuencia de la sequía, se disminuye el caudal del agua en la capital. La planta Lo de Coy registro $7.7 \cdot 10^7$ L/día (900 L/s), cuando la norma en esta época es de 1200 litros/segundo, informando también que recientemente se han abierto 34 pozos a unos 1500 metros de profundidad, cuando la norma no es mayor de 1000 m. La empresa analiza habilitar más de 30 nuevos pozos si la situación se agudiza. Recientemente, la empresa municipal de agua de la municipalidad capitalina realizó una evaluación para disponer un racionamiento en la distribución del agua potable.

La Organización de Naciones Unidas (ONU) reconoce que más de 1,400 millones de personas carecen de agua potable y más de 5.3 millones mueren cada años. Cada 8 segundos muere en el mundo un niño por una enfermedad relacionada con la problemática en la contaminación del agua, ya sea por enfermedades gastrointestinales, intoxicaciones o falta de acceso.

Con el fin de ilustrar la importancia que tiene el uso adecuado del agua y sus beneficios para la salud, la economía familiar y para el desarrollo del país, nos basaremos en el estudio realizado por las Naciones Unidas, que refiere que en el año 1999, 31 países presentan problemas graves de escasez de agua, para el año 2025 serán 48 países y para el año 2050, 55 países lo que afectará directamente a 2500 millones de seres humanos.

Además, estudios a nivel centroamericano indican que de los 35 millones de pobladores de la región centroamericana, 20 millones consumen agua contaminada. (López, I. 2006)

- Condiciones sanitarias.

La mayor parte de las enfermedades comunes en Guatemala responden a deficiencias en el servicio como el agua potable o el alcantarillado. Es importante resalta que disponer de tubería no necesariamente equivale a captar en todo momento agua potable, ya que frecuentemente esta no llega las 24 horas del día en numerosos hogares. Además, en los últimos años la contaminación ha ido aumentando en la mayoría de las fuentes de agua.

Por lo general, las poblaciones contraen enfermedades relacionadas con el agua por el consumo del líquido o alimentos contaminados directa o indirectamente. En el caso de Guatemala, las enfermedades transmitidas causan una proporción considerable de las muertes prematuras, especialmente en los primeros cinco años de vida, un elevado porcentaje de este grupo son las enfermedades diarreicas de origen fecal, y se transmiten a través de las manos, alimentos o el agua contaminada. (López, I. 2006)

- Efectos de escasez del agua.

Es necesaria una evaluación en el impacto que el recurso hídrico ocasiona en la economía del país ya que se ve como una pérdida de oportunidades de desarrollo. En muchas ocasiones, se tienen pérdidas económicas por inundaciones, perdidas en generación de energía hidroeléctrica, deterioro del desarrollo turístico y recreativo, poco desarrollo de nuevos medicamentos, drogas, productos químicos y alimentos y altos costos sociales.

Así mismo, presenta efectos negativos en los elevados índices de enfermedades originadas por falta, escasez y contaminación de este líquido vital, ocasionando incluso la muerte especialmente de niños y ancianos. (López, I. 2006)

C. Tipos de tratamiento de agua residual

- Pre -tratamiento

El pre tratamiento se efectúa previo al tratamiento primario. El objetivo principal del pre tratamiento es eliminar los desechos muy grandes o voluminosos que puedan llegar a la planta de tratamiento y con esto aumentar la efectividad y eficiencia de toda la planta de tratamiento. Para estos procesos, son utilizados rejillas, tamices y macro filtros. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

- Rejillas.

Su fin principal es la retención de todos los sólidos o material grueso. Su principal objetivo es retener basuras, material sólido grueso que pueda afectar el funcionamiento de las bombas, válvulas, aireadores, etc. Se utilizan solamente en los desbastes previos, y sirven para que los desechos no dañen las maquinas. Se construyen con barras de 6 mm de grosor y son acomodadas aproximadamente a 100 mm de distancia. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

Imagen1: Rejillas para un pre tratamiento de agua residual



(Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

- Tamices

Luego de las rejillas se colocan Tamices, con aberturas menores para remover un porcentaje más alto de sólidos, con el fin de evitar atascamiento de tuberías, filtros biológicos, con una abertura máxima de 2.5 mm. Tienen una inclinación particular que deja correr el agua y hace deslizar los desechos por fuera de la malla. Necesita

un desnivel importante entre el punto de alimentación del agua y el de salida. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

- Macrofiltros

Son planillas giratorias plásticas o de acero por las cuales circula el agua y recogen los desechos y las basuras en su interior, el micro filtros tiene sistemas de lavado para que así puedan mantener las mallas limpias. Dependiendo de la aplicación que tengan se selecciona el tamaño de las mallas.

(Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

- Tratamiento primario

Este tipo de tratamiento emplea procesos físicos o físico-químicos con el fin de remover los materiales que son posibles de sedimentar. En algunos casos, se dejan las aguas residuales un tiempo en grandes tanques o se añade al agua contenida en estos grandes tanques, sustancias químicas quelantes (sustancias que forman complejos con iones de metales pesados) que hacen más rápida y eficaz la sedimentación. Este tipo de tratamiento también incluye la neutralización del pH y la eliminación de contaminantes volátiles como el amoníaco. Las operaciones que incluye son el desaceitado y desengrase, la sedimentación primario, la filtración, neutralización y desorción. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

La sedimentación física es el proceso mediante el cual se dejan asentar por gravedad los sólidos en suspensión en las aguas residuales. Las bacterias que crecen en este medio, junto con otros sólidos, se retiran en un tanque de sedimentación secundario y se hacen entrar de nuevo al tanque de ventilación. En este tipo de tratamiento se pueden retirar de un 60 a un 65% de los sólidos sedimentables y de 30 a 35% de los sólidos suspendidos en las aguas residuales. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

- Tratamiento secundario

El objetivo es eliminar desechos y sustancias que con la sedimentación no se eliminaron y para remover las demandas biológicas de oxígeno. Con estos tratamientos secundarios se pueden eliminar las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. Este proceso acelera la

descomposición de los contaminantes orgánicos. El procedimiento secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso se suele hacer llevando el efluente que sale del tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de lodos activos (microorganismos). Estos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que garantizan condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente se conduce este líquido a tanques cilíndricos, con sección en forma de tronco de cono, en los que se realiza la decantación de los lodos. Separados los lodos, el agua que sale contiene muchas menos impurezas. Una parte de estos lodos son devueltos al tanque para que así haya una mayor oxidación de la materia orgánica. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

Se utilizan también los biodiscos que están contruidos con un material plástico por el que se esparce una película de microorganismos que se regulan su espesor con el paso y el rozamiento del agua. Puede estar sumergido de un 40 a un 90 % y las partes que queda en la superficie es la encargada de aportar el oxígeno a la actividad celular.

El lagunaje es utilizado en terrenos muy extensos y su duración es de 1/3 días en el proceso de retención. La agitación debe ser suficiente para mantener los lodos en suspensión excepto en la zona más inmediata a la salida del efluente. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995).

- Tratamiento terciario

Consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, etc. Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales como por ejemplo para purificar desechos de algunas industrias.

Algunas veces el tratamiento terciario se emplea para mejorar los efluentes del tratamiento biológico secundario. Se ha empleado la filtración rápida en arena para poder eliminar mejor los sólidos y nutrientes en suspensión y reducir la demanda bioquímica de oxígeno.

Una mejor posibilidad para el tratamiento terciario consiste en agregar uno o más estanques en serie a una planta de tratamiento convencional. El agregar esos

estanques de "depuración" es una forma apropiada de mejorar una planta establecida de tratamiento de aguas residuales, de modo que se puedan emplear los efluentes para el riego de cultivos o zonas verdes y en acuicultura. (Metacalf, Hedí, Inc. 1995)

D. Sistemas naturales para el tratamiento de agua residual.

Los sistemas naturales, también llamados tecnologías no convencionales o sistemas de bajo costo, son mecanismos que logran la eliminación de sustancias y componentes contaminantes en las aguas residuales. Su principal característica es que no requieren de uso de energía externa ni aditivos químicos. A diferencia de los sistemas convencionales, los sistemas naturales presentan una mayor superficie de tratamiento y sus costos de operación, mantenimiento y construcción son relativamente más bajos. . (Corzo, A. 2008)

Los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse en dos categorías. Estas pueden ser basadas en el terreno y su contacto con el agua a tratar, como es el caso de aplicaciones subsuperficiales y superficiales, y basado en los procesos que ocurren en una masa determinada de agua, como el caso de sistemas con plantas flotantes y lagunaje natural. (Corzo, A. 2008)

- **Humedales construidos.**

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas. Las condiciones de saturación se mantienen por toda el área y estos suelen tener profundidades inferiores a 60 cm. El proceso de descontaminación tiene lugar mediante la interacción entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos y fauna.

Una de las características de los humedales es la vegetación con plantas emergentes. La función de ésta es proporcionar superficies para la formación de películas bacterianas, permite la transferencia de oxígeno hacia las capas y columnas de agua y limita el crecimiento de algas en las partes profundas del humedal, ya que limita la luz del sol y por lo tanto la fotosíntesis de algas. (Corzo, A. 2008).

- Componentes de un humedal

1. Agua. La hidrología es el factor más importante en el diseño y construcción de un humedal ya que es en donde ocurren todos los procesos y biológicos y químicos que dan lugar al proceso de tratamiento. Es el factor primario del que depende el éxito o fracaso que pueda tener el humedal. A diferencia de otros procesos de aguas superficiales y cercanas a superficie, los humedales presentan aspectos importantes como:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmosfera a través de la lluvia y la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y perdidas a través de la transpiración de las plantas.
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, ya que evita los cambios bruscos de temperatura, exposición al viento y sol.

(Lara Borrero, J. 1999).

2. Sustratos, sedimentos y restos de vegetación. Los sustratos en los humedales construidos incluyen arena, grava, roca, suelo y materiales orgánicos como el compost. Los sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. Este tipo de compuestos presentan importancia por varias razones:

- I. Soportan muchos de los organismos vivientes en el humedal
- II. La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal
- III. Muchas de las transformaciones químicas y biológicas tienen lugar dentro del sustrato
- IV. El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes
- V. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, la cual da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía

para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.
(Lara Borrero, J. 1999)

3. Vegetación. La presencia física de plantas en el sistema permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporte de oxígeno de manera más profunda. La importancia de las plantas en los humedales es que las porciones sumergidas de hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de la mayor parte del tratamiento. (Lara Borrero, J. 1999)

La contribución de las plantas emergentes en el tratamiento de agua residual radica en:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Las plantas emergentes más utilizadas en los humedales incluyen carrizo, juncos, juncos de laguna y espadañas, entre otros. Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un incremento en los valores del hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, se incluyen una variedad de plantas para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuáticas.

(Lara Borrero, J. 1999)

4. Microorganismos. Una de las características principales de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La masa microbiana es la encargada de consumir gran parte del carbono orgánico y gran parte de los nutrientes. La actividad microbiana transforma un gran número de sustancias orgánicas e

inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles y está involucrada en el reciclaje de nutrientes. (Lara Borrero, J. 1999)

Las poblaciones microbianas tienden a ajustarse a cambios en el agua que puedan ocurrir y pueden extenderse rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante largos periodos de tiempo. (Lara Borrero, J. 1999)

Algunos de los microorganismos son aeróbicos, es decir, requieren oxígeno libre para poder sobrevivir, mientras que otros son anaeróbicos, ya que tienen lugar en ausencia de oxígeno libre. Algunas otras son facultativas, ya que son capaces de funcionar bajo condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

(Lara Borrero, J. 1999)

- Clasificación de los microorganismos

Los microorganismos se clasifican de acuerdo con sus niveles tróficos, es decir, por su fuente de energía y de carbono y su relación con el oxígeno.

También se pueden clasificar según su régimen predilecto de temperatura. Cada especie de bacteria se reproduce mejor dentro de un intervalo limitado de temperaturas, para clasificarlas se usan cuatro intervalos.

- Las Psicrófilas: Las que crecen mejor a temperaturas menores de 20°C.
- Las mesófilas crecen mejor a temperaturas de 25°C a 40°C.
- Las termófilas: crecen mejor entre 45°C a 60°C.
- Las estenotermófilas: Se desarrollan en temperaturas mayores a 60°C.

El intervalo de crecimiento de las termófilas facultativas va desde el termofílico al mesofílico. Esos intervalos son cualitativos y algo subjetivos.

Las bacterias crecerán dentro de un intervalo de temperaturas y sobrevivirán a un intervalo muy grande de temperaturas. Por ejemplo, *Escherichia Coli* se clasifica como mesófila y crece a temperaturas de 20 a 50°C y se reproduce aunque con mucha lentitud, a temperaturas hasta de 0°C. Si se congela con rapidez, éste y muchos otros microorganismos permanecen latentes durante años sin mortandad importante. (Davis y Masten, 2005)

▪Bacterías

Serán la población mayor de organismos en una planta de tratamiento de aguas residuales. Las condiciones de la planta se ajustan de tal modo que predominen los quimioheterótrofos. No hay especie determinada que se haya seleccionado como la mejor.

•Hongo

Organismos multicelulares, no fotosintéticos y heterótrofos. Son aeróbicos obligados que se reproducen por varios métodos, que incluyen fisión, gemación y formación de esporas. Requieren sólo la mitad de nitrógeno que las bacterias, por lo que en un agua residual con deficiencia de nitrógeno predominarán sobre las bacterias.

▪Algas

Son fotoautótrofos, y pueden ser uni o multicelulares. Debido a la clorofila que contienen la mayoría de las especies producen oxígeno por fotosíntesis. En presencia de luz solar la producción fotosintética de oxígeno es mayor que la cantidad empleada en la respiración. Durante la noche respiran oxígeno. Si las horas de luz diurna rebasan a las nocturnas en una cantidad razonable habrá una producción neta de oxígeno.

▪Protozoarios

Organismos unicelulares capaces de reproducirse por fisión binaria (división en dos) La mayoría es quimioheterótrofos y con frecuencia consumen bacterias. Son deseables en las descargas de aguas residuales porque actúan como exterminadores al consumir las bacterias. (Davis y Masten, 2005)

- Bioquímica bacteriana en metabolismos.

El término general que describe todas las actividades químicas de una célula es metabolismo, que a su vez se divide en dos partes: catabolismo y anabolismo. El catabolismo incluye los procesos bioquímicos con los que se degrada un sustrato y forma, mientras libera energía, productos finales. El sustrato es el alimento. En el tratamiento de aguas residuales el sustrato se oxida. El proceso de oxidación libera energía, la cual se transfiere a un portador que la almacena para que la bacteria la utilice después. Algunas sustancias químicas que el catabolismo desprende las aprovecha la célula bacteriana en sus funciones vitales. El anabolismo incluye los procesos químicos mediante los cuales la bacteria sintetiza nuevos compuestos químicos necesarios para que las células vivan y se reproduzcan. El proceso de síntesis lo impulsa la energía almacenada en el portador de energía.

(Davis y Masten, 2005)

- Descomposición de residuos

El tipo de receptor de electrones disponibles para el catabolismo determina el tipo de descomposición que usa un cultivo mixto de microorganismos (aeróbica, anóxica o anaeróbica). Cada tipo de descomposición tiene características peculiares que afectan su uso en el tratamiento de desechos. (Davis y Masten, 2005)

- Descomposición aeróbica

El oxígeno molecular debe estar presente como receptor terminal de electrones para que la descomposición se efectúe mediante oxidación aeróbica. Los productos químicos finales de la descomposición son principalmente dióxido de carbono, agua y nuevo material celular. Los productos finales gaseosos malolientes se mantienen en un mínimo. En los sistemas saludables de aguas naturales la descomposición aeróbica es el principal medio de auto purificación. Un espectro más amplio de materiales orgánicos se oxida de manera aeróbica más que por cualquier otro tipo de descomposición. Este hecho, aunado a que los productos finales se oxidan mientras no tengan un contenido de energía muy bajo, genera un producto final más estable que es posible obtener con los demás sistemas de descomposición. Debido a la gran cantidad de energía que se libera en la oxidación aeróbica, la mayoría de los organismos aeróbicos tienen altas tasas de crecimiento, lo que ocasiona la producción de más lodo biológico en estos sistemas. (Davis y Masten, 2005)

- Descomposición anóxica

Es el tipo de oxidación en la cual los microorganismos usan nitratos como receptores terminales de electrones en ausencia de oxígeno molecular. (Proceso de desnitrificación) Los productos finales de la desnitrificación son nitrógeno gaseoso, dióxido de carbono, agua y nuevo material celular. La cantidad de energía disponible para la célula es similar a la que dispone durante la descomposición aeróbica. Por lo tanto, la tasa de producción de células nuevas es relativamente alta. Este proceso es importante para eliminar el N que llega al cuerpo receptor, además ayuda a clarificar el agua tratada, ya que el lodo flota en la superficie y éste puede ser removido. (Davis y Masten, 2005)

- Descomposición anaeróbica

Este tipo de descomposición requiere que no haya oxígeno molecular ni nitrato como receptores terminales de electrones. El sulfato, dióxido de carbono y los compuestos orgánicos que se puedan reducir sirven como receptores terminales de electrones. La reducción de sulfato induce la producción de sulfuro de hidrógeno y de un grupo de compuestos orgánicos de azufre, igual de malolientes, llamados mercaptanos. La descomposición anaeróbica es un proceso de dos pasos. En el primero los compuestos orgánicos complejos se fermentan hasta formar ácidos grasos de bajo peso molecular (ácidos volátiles). En la segunda etapa los ácidos orgánicos se convierten en metano. El dióxido de carbono sirve como receptor de electrones. Los productos finales son dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno. La cantidad de producción de células es baja, ya que las cantidades de energía liberadas son pequeñas. Por consiguiente la producción de lodos también es baja. (Davis y Masten, 2005)

E. Tipos de humedales

- Humedal de flujo superficial

En los sistemas de flujo superficial el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales presentan una profundidad de la lámina de agua entre 0.3 y 0.4 m.

- Humedal de flujo subsuperficial

Para este tipo de sistemas de tratamiento, la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0.3 y 0.9 m. Para este proceso, se obtiene un biopelícula la cual crece adherida al medio granular.

En comparación a los humedales de flujo superficial, los sub-superficiales presentan una mayor capacidad de tratamiento, ya que admiten mayores cargas orgánicas, bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, dado a que el flujo circula a profundidades mayores y una menor utilidad para proyectos de restauración ambiental, debido a la falta de lámina de agua accesible. (Corzo, A. 2008)

- Tipos de humedales de flujo sub- superficial

Estos tipos de humedales se clasifican según el sentido de circulación del agua en:

i. Humedales de flujo horizontal

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de $6 \text{ g DBO/m}^2 \cdot \text{día}$. . (Corzo, A. 2008)

Los humedales horizontales están compuestos por los siguientes elementos:

- Estructura de entrada de afluente y salida de efluente.

Las estructuras de entrada y salida de agua deben de estar muy bien diseñadas, ya que la repartición del agua residual por todo el sistema debe de ser distribuida uniformemente. De esto depende en gran parte la eficiencia de remoción que se pueda obtener en el sistema y el funcionamiento adecuado del mismo.

El agua residual procedente de los tratamientos previos puede hacer llegar hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema.

La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. Esta tubería conecta con otra en forma de "L" invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel de agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento. (Corzo, A. 2008)

- Medio granular

El medio granular para un humedal construido es el factor más importante ya que en él ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia orgánica en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de nutrientes y la inactivación de microorganismos patógenos. (Corzo, A. 2008)

En las zonas de entrada y salida de los humedales se colocan usualmente piedras de gran tamaño, con el fin de diferenciar estas zonas del medio granular principal, mientras que para todo el demás sistema es posible utilizar diámetros medios de alrededor de 5-8 mm. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él. Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo.

- Vegetación emergente

Las especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo (*Phragmites*), la espadaña (*Typha*) o los juncos (*Scirpus*).

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son:

- ✓ Amortiguamiento de las variaciones ambientales.

La vegetación emergente permite una estabilidad en la temperatura del sistema, ya que reduce la intensidad de luz solar incidente sobre el medio granular evitando elevaciones de temperatura en la profundidad y contralando la fotosíntesis y eutrofización de las algas. Para el caso de climas fríos, la vegetación protege de la congelación de agua.

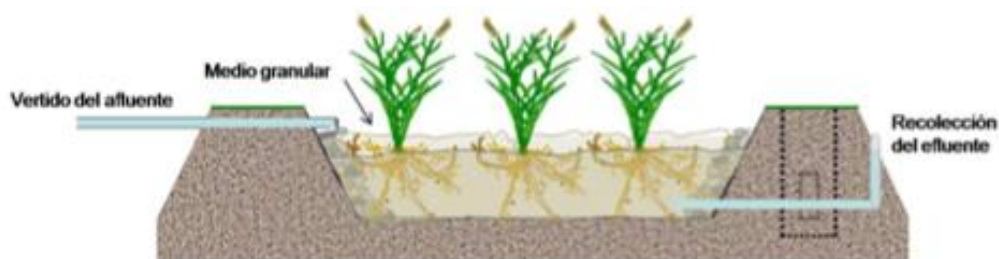
- ✓ Asimilación de nutrientes por parte de las plantas.

A pesar que la contribución para la eliminación de nutrientes no es significativa (10% del nitrógeno y 20% para fósforo), en aguas residuales diluidas la eliminación de nutrientes puede alcanzar hasta un 50% de remoción.

- ✓ Superficie de contacto adecuada para el crecimiento de biopelículas.

La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación. (Corzo, A. 2008)

Imagen 2: Humedal subsuperficial de flujo horizontal



(Corzo, A. 2008)

ii. Humedales de flujo vertical

En la mayoría de ocasiones, los sistemas verticales se combinan con horizontales para que ocurran los procesos de nitrificación y des-nitrificación y con esto lograr eliminar el nitrógeno en el agua.

Los sistemas verticales presentan una mayor capacidad de tratamiento en comparación a los horizontales, ya que requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica. La profundidad del medio granular se encuentra entre 0.5 y 0.8m y operan con cargas de alrededor de 20g DBO/m² día.

(Corzo, A. 2008)

Al igual que los humedales de flujo horizontal, los humedales de flujo vertical cuentan con la siguiente estructura:

I. Estructura de entrada de afluente y salida de efluente.

Es muy importante lograr una distribución y recogida del agua uniforme en toda el área del sistema. Para la distribución se utilizan redes de tuberías dispuestas sobre la superficie, ya sea en forma radial o a lo largo del lecho. Debido al flujo discontinuo, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el lecho entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación.

La recogida del agua se realiza mediante redes de tuberías perforadas situadas sobre el fondo del lecho y a lo largo del mismo. (Corzo, A. 2008)

II. Medio granular

Igual que en los sistemas horizontales, el medio granular debe ser limpio, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. En los humedales verticales el medio granular es de tipo heterogéneo ya que se disponen tres capas horizontales con distinta granulometría, la cual aumenta con la profundidad del lecho. La capa más superficial es de arena gruesa, la intermedia de grava y la del fondo de grava

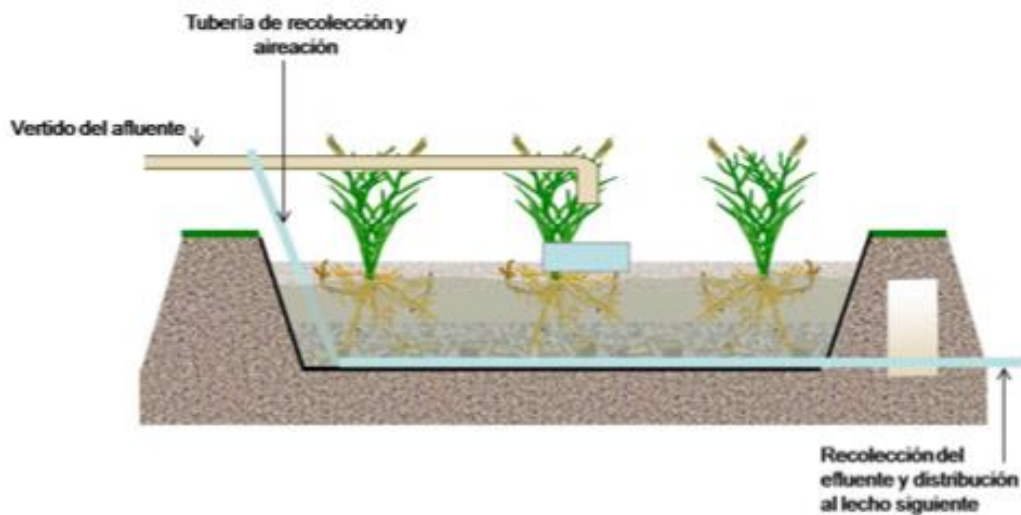
gruesa. Esta disposición se adopta para que el paso del agua por el lecho no sea excesivamente rápido o lento. (Corzo, A. 2008)

III. Vegetación emergente

Al igual que los sistemas de flujo horizontal, as especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo (*Phragmites*), la espadaña (*Typha*) o los juncos (*Scirpus*).

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de un humedal de flujo vertical son los mismos, donde la asimilación de nutrientes por parte de las plantas, el amortiguamiento de las variaciones ambientales y una Superficie de contacto adecuada para el crecimiento de biopelículas juegan un papel vital para el proceso. (Corzo, A. 2008)

Imagen 3: Humedal de flujo vertical



(Corzo, A. 2008)

F. Biofiltros

La biofiltración es una tecnología conocida, utilizada para el tratamiento de gases y olores; cuyo principio consiste en hacer pasar los contaminantes del aire a un

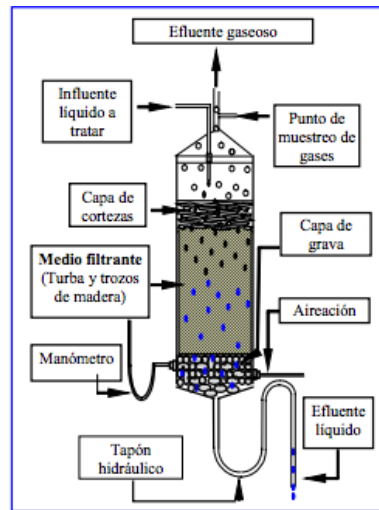
medio líquido a través de una columna de materia orgánica (biofiltro) humedecida, sobre la cual crecen microorganismos que se alimentan de estos contaminantes. Hace algún tiempo se comenzó a utilizar una variante de estos biofiltros para tratar aguas residuales y no solamente gases. Esta nueva tecnología conocida como biofiltración sobre cama orgánica incluye principios de un filtro percolador y de un biofiltro tradicional para olores. Está constituida por una cama de materia orgánica que hace las veces de un filtro natural con muy alta porosidad y propiedades de adsorción y absorción. El medio filtrante (MF) retiene los contaminantes contenidos en el agua residual principalmente por procesos físicos y químicos propios de un filtro. Por otro lado, el MF también sirve de soporte para el crecimiento de importantes poblaciones de microorganismos que degradan los contaminantes retenidos en el filtro, regenerando así la capacidad de filtración y de depuración del sistema. (Garzón, M.2003).

Esto se logra estableciendo un equilibrio entre la tasa de deposición de contaminantes y el crecimiento de las poblaciones de microorganismos razón por la cual esta tecnología emplea caudales bajos y TRH elevados. Se trata entonces de un biofiltro percolador en el cual se lleva a cabo una infiltración muy lenta sobre material orgánico muy adsorbente que permite establecer un equilibrio entre la carga de contaminantes y el crecimiento de diferentes poblaciones de microorganismos dentro del biofiltro. Esta tecnología es actualmente empleada a nivel industrial en Canadá y Francia para el tratamiento de diferentes aguas principalmente agroindustriales. En México esta nueva tecnología se encuentra en fase experimental. (Garzón, M.2003).

Esta tecnología se caracteriza por ser un proceso de tratamiento pasivo, ya que la filtración del agua se realiza a una velocidad lenta, degradando la materia orgánica que queda entre los espacios del material soporte de la biomasa, y se degrada por biocenosis, acompañada de intercambio iónico, adsorción y absorción, así como la remoción de coliformes fecales.

Ante la falta de tecnología y el escaso presupuesto para construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades y/o centros educativos y de investigación, esta tecnología es una alternativa para resolver esta problemática y aprovechar el agua para riego de áreas verdes. (Garzón, M.2003).

Imagen 4: Biofiltro de lecho orgánico



(Garzón, M.2003).

III. ANTECEDENTES

El inicio de este trabajo de investigaciones está siendo desarrollado en algunos países de América Latina, principalmente en México, donde sistemas de humedal tipo entramados de raíces han sido construidos por el Centro de Innovaciones en Tecnologías Alternativas (CITA) en el estado de Morelos. Este tipo de tecnología es un tipo particular de humedal sub- superficial construido en canales. Son canales con vegetación hidrófita enraizada emergentes sobre un material de soporte inerte inundado por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas.

Por otra parte, el sistema de biofiltros sobre materiales orgánicos leñoso, ha sido desarrollado en México por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en colaboración con el CRIQ (Centre de la Recherche Industrielle du Québec), y se presenta como una opción viable en este contexto, ya que se trata de una tecnología no convencional, de bajo costo de construcción y operación, con la ventaja de requerir un mínimo de operación y poco mantenimiento no especializado.

La UNAM por medio del Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM) conduce en Morelos, México un ambicioso macro-proyecto de investigación-intervención bajo el nombre de "Manejo de desarrollo humano" dentro del marco del Programa de Saneamiento del Río Apatlaco, que abarca el saneamiento del río, la restauración de los ecosistemas y comunidades degradadas, así como el rescate de especies en peligro de extinción.

Como parte importante de este proyecto, el IMTA está trabajando en forma conjunta con el CRIM, en el desarrollo y aplicación de sistemas de tratamiento alternativos para el saneamiento de las aguas residuales domésticas en comunidades rurales marginadas y zonas urbanas, de forma específica en la colonia de Sacatierra, Cuernavaca, Morelos.

Los Colegios Profesionales de Guatemala son asociaciones gremiales profesionales con personalidad jurídica, patrimonio propio, sin fines de lucro y apolíticas. Es decir, son asociaciones o colegios que reúnen a los distintos profesionales universitarios egresados de las diferentes casas de estudios de todo el

País, con los fines de la superación moral, científica, técnica, cultural, económica y material de cada uno de ellos

La Asamblea de Presidentes de los Colegios Profesionales de Guatemala es un cuerpo colegiado integrado por todos los Presidentes de los Colegios Profesionales que existe. Como entidad es de naturaleza gremial, no lucrativa, apolítica y laica. Además cuenta con personalidad jurídica y patrimonio propio. Tiene su sede en el 10º nivel del Edificio de los Colegios Profesionales ubicado en la 0 Calle 15-46 Zona 15, Colonia El Maestro, Ciudad de Guatemala

Los órganos de la Asamblea de Presidentes de Los Colegios Profesionales de Guatemala son los siguientes:

1. Asamblea General: Es el órgano superior integrado por todos los Presidentes de los Colegios profesionales.
2. Junta Directiva: Es el órgano coordinador de las actividades de la Asamblea de los Presidentes integrado por un Presidente, Vicepresidente, Secretario, Pro-secretario y Tesorero.
3. Comisiones: Son órganos permanentes o temporales según sea el caso. Están integradas por tres miembros de la Asamblea de los Presidentes. Cada presidente debe formar parte de una como mínimo. Actualmente existen cuatro comisiones permanentes: una para planificación y presupuesto, para construcción y mantenimiento, para acreditación y educación continuada y otra para cultura y deportes.

Al inicio del trabajo de investigación, las instalaciones de Los Colegios Profesionales no contaba con un sistema de tratamiento de agua residual, por lo que el interés por ambas partes, tanto de los investigadores, como de la Asamblea de Presidentes de los Colegios Profesionales, llevo a plantear y aceptar el proyecto en un área verde a un costado de la cancha deportiva.

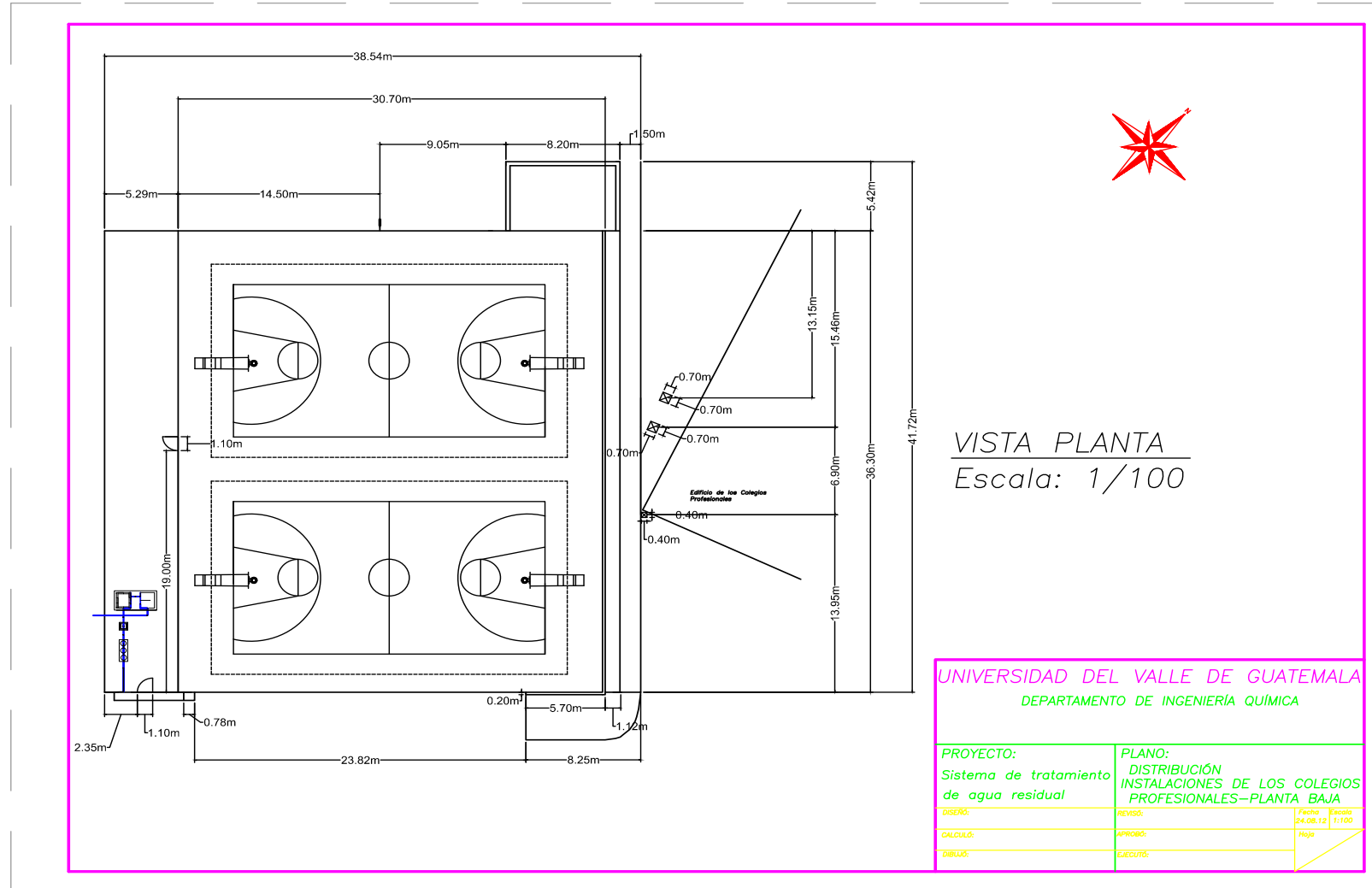
El agua residual generada principalmente por los sanitarios, lavamanos y duchas se mezclaba con agua pluvial en los drenajes subterráneos y con la ayuda del sistema de alcantarillado, se descartaba en un río que atraviesa la parte de atrás del edificio.

El problema de la acción era que en el río no únicamente se descarta el agua residual del edificio, sino que de comercios, residenciales y otros edificios cercanos a la zona.

Imagen 5. Edificio de los Colegios Profesionales de Guatemala.



Imagen 5: Planos de distribución de área recreativa del edificio de Los Colegios Profesionales



IV. JUSTIFICACIONES

En Guatemala, solo el área metropolitana genera anualmente 140 millones de m³ de aguas residuales, por lo que ríos, lagos y fuentes de agua se encuentran contaminadas de desechos orgánicos y altas concentraciones de desechos químicos por lo que la mayor parte de la población no tiene acceso a agua potable. Por lo tanto, es necesario buscar alternativas innovadoras para poder tratar el agua residual, ya que los que se tienen actualmente, son de altos costos de instalación, operación y mantenimiento, (por encima de Q.100, 000.00 dependiendo su capacidad) y emplean grandes cantidades de energía eléctrica y aditivos químicos. Más del 70% de estos sistemas de tratamiento de agua residual en Guatemala no se encuentran funcionando y se tienen abandonados. Una de las alternativas innovadoras es el desarrollo de sistemas naturales utilizando material orgánico con medio filtrante y plantas emergentes para la absorción de nutrientes y contaminantes, ya que no emplea altos consumos de energía eléctrica, evita el uso de aditivos químicos y su control y monitoreo son más sencillos. (El costo de equipo utilizado durante el proyecto y su instalación fue de Q 30,507.59)

Otro de los beneficios que representan los tratamientos naturales es su alta eficiencia (mayor a 90%) de remoción de contaminantes: Sólidos suspendidos totales y coliformes fecales, alcanzando casi un 90% de eficiencia y su capacidad para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Actualmente, no se cuenta con la suficiente cantidad de investigaciones e información que permita dar a conocer los sistemas de tratamiento naturales, por lo que obtuvo información y datos para publicaciones. Así mismo, el edificio de Los Colegio Profesionales de Guatemala no contaba con un sistema para el tratamiento de agua residual, por lo que se buscó una alternativa innovadora y de bajos costos para el tratamiento de agua residual. Con este tipo de tecnología, se pretende crear un impacto ambiental y social positivo para el beneficio de las comunidades guatemaltecas y la población en general.

V. OBJETIVOS

A. General

Diseñar, construir y evaluar un humedal de flujo sub superficial con plantas emergentes como parte de un sistema natural de tratamiento de agua residual a implementar, con el fin de reducir los niveles de contaminantes.

B. Específico

1. Diseñar y determinar el volumen del humedal, Tiempo de retención hidráulica (TRH), Carga hidráulica (CH) y Cargas orgánicas superficiales (COS) como bases de diseño del humedal.
2. Analizar la disminución de contaminantes: DBO, DQO, fósforo, nitrógeno, SST y coliformes fecales en el efluente de los humedales empleando análisis fisicoquímicos y microbiológicos periódicos.
3. Determinar la eficiencia de la tecnología de humedal y la eficiencia del sistema global.
4. Determinar los costos de materiales, equipo e instalación del sistema de tratamiento de agua residual.

VI. PROBLEMA A RESOLVER

Con el sistema de tratamiento de agua residual instalado, se espera reducir los niveles de concentraciones de contaminantes a fin de cumplir, como mínimo, con los establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Según los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados al agua, es posible comparar los niveles para sólidos suspendidos totales (SST), el potencial de hidrógeno (pH) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Así mismo, se obtendrán datos e información sobre la tecnología de humedal de flujo sub superficial y su integración en un sistema de tratamiento de agua residual natural, que nos permitirán demostrar su eficiencia para reducir los niveles de contaminantes en el agua y sus beneficios económicos, la facilidad de instalación y operación del sistema y beneficios sociales para la ayuda de las comunidades guatemaltecas. Con los datos e información recaudada, se realizará una propuesta formal para emplear la tecnología útil e innovadora para el beneficio de las comunidades y la población guatemalteca, con el fin de crear un impacto social y ambiental positivo al publicar los resultados de esta investigación.

VII. **METODOLOGÍA**

- A. Se realizó una revisión bibliográfica de sistemas de tratamiento de agua residual,
 - 1. Revisión de construcción, diseño y operación de sistemas desarrollados en otros países. (IMTA, México).
- B. Se analizó el terreno en donde se colocaría la planta de tratamiento de agua residual.
 - 1. Se realizaron visitas periódicas a las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales de Guatemala ubicado en la 0 calle 15-46 zona 15, Colonia El Maestro, Ciudad de Guatemala.
 - 2. Con la ayuda de una cinta métrica, se tomaron las dimensiones de todo el terreno y del área a colocar los equipos y sistemas auxiliares.
- C. Se dimensionó y ubicó la caja de registro con agua residual cercana al terreno en donde se colocará la planta de tratamiento.
 - 1. Con la ayuda de una cinta métrica, se midió la distancia entre la caja de agua residual y la entrada al sistema de tratamiento.
- D. Se dimensionó y ubicó la caja donde se colocará la bomba centrífuga 0.37kW (0.5 HP).
 - 1. Se construyó una caja de concreto con las dimensiones específicas para la bomba centrífuga.
- E. Se planificó las actividades por medio de un Cronograma de Actividades. (Ver página 99 en la sección de Apéndice).
- F. Se dimensionó y se definieron las bases de diseño del sistema de tratamiento de agua residual, en base los niveles de contaminación del agua residual a tratar.
 - 1. Dimensionamiento y diseño de biofiltro.
 - 2. Dimensionamiento y diseño de humedales.
 - a. Diseñar el humedal con la ayuda del método Kadlec y Knight (1996) para determinar su caudal, área y volumen.
 - 3. Dimensionamiento y diseño de equipos auxiliares

4. Elaboración de planos en AUTOCAD con la ubicación y medidas del terreno y de los equipos a instalar.
- G. Se determinó el caudal de agua residual a tratar, utilizando los parámetros reales del agua residual que se va a tratar.
- H. Se realizaron cotizaciones de materiales y equipo para la construcción de la planta de tratamiento de agua residual.
- I. Se construyó la planta de tratamiento. La construcción de la planta incluyen:
1. Colocación de fosas sépticas, utilizando tres cubetas de 40 L y todas sus conexiones de tubería.
 2. Construcción de estructura metálica donde se colocará el biofiltro de lecho orgánico.
 3. Obtención de trozos de madera del árbol de ficus.
 4. Trituración de madera de árbol de ficus y colocación dentro de biofiltro.
 5. Construcción de estructura de humedal de flujo subterráneo con la ayuda de tanques cúbicos con capacidad de 1m³.
 6. Colocación de piedra de río, piedrín y plantas dentro de los 2 humedales.
 7. Conexiones de tuberías y accesorios de PVC las cuales conectarán todo el sistema de tratamiento desde su salida en la bomba centrífuga hasta la salida del segundo humedal.
 8. Colocación e instalación de bomba centrífuga Marca StarRite 0.5 HP, encargada de extraer el agua de la caja de registro y transportarla por todo el sistema de tratamiento.
 9. Conexiones eléctricas de todo el sistema, desde la caja de salida de energía, alimentando a la bomba peristáltica que dosifica el biofiltro, medidores de nivel en cubetas de fosas sépticas y bomba centrífuga Marca StarRite 0.5 HP.
- J. Se realizaron las pruebas iniciales y puestas en marcha de planta de tratamiento de agua residual en el área donde se operará.
- K. Se monitoreó y evaluó el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua residual. El monitoreo y evaluación incluyen:

1. Evaluación en afluente y efluente en fosa séptica, biofiltro y humedal obteniendo los parámetros de DBO, DQO, Nitrógeno, Fosforo, SST y coliformes fecales.
 2. Control para evitar que el sistema se colmate afectando la eficiencia del proceso.
 3. Control del crecimiento de las plantas para el humedal de flujo subterráneo.
- L. Se analizó el agua residual en laboratorio que incluye: DBO, SST, coliformes totales, fosfatos y nitratos utilizando. Los métodos de análisis se encuentran listados en la sección de Métodos de Análisis de Agua residual de la sección de Apéndice.

VIII. RESULTADOS

Tabla 1: Área de humedal requerida para cada parámetro a tratar utilizando el método de Kadlec y Knight (1996).

Parámetro	Área (m ²)
DBO	0.038
SST	0.002
NT	0.038
PT	0.034
CF	0.089

- DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- SST = Sólidos Suspendidos Totales.
- NT = Nitrógeno Total.
- PT = Fósforo Total.
- CF = Coliformes Fecales.

Tabla 2: Caudal de agua residual a tratar en humedal utilizando el Método de Kadlec y Knight, (1996).

Parámetro	Caudal (m ³ /día)	Caudal (L/día)
DBO	0.26	261.28
SST	5.29	5287.78
NT	0.26	262.82
Caudal de biofiltro teórico	0.00335	3.35
Caudal experimental	0.001648	16.48.

Tabla 3: Resultados de volumen de humedal, tiempo de retención hidráulica (TRH), Carga hidráulica (CH) y Cargas orgánicas superficiales (COS).

Descripción.	Valor	Unidad
Volumen total de cada tanque	0.9	m ³
Porcentaje de porosidad de piedrín	50	%
Volumen real de humedal utilizando el 50% de porosidad de piedrín.	0.36	m ³
Tiempo de retención Hidráulica	14.62	Días
Carga Hidráulica de Humedal	1.7409	m /día
Cargas orgánicas superficiales	0.7851	kg DBO/(m ² *día)

Imagen 5: Diagrama de bloques de proceso de tratamiento de agua residual

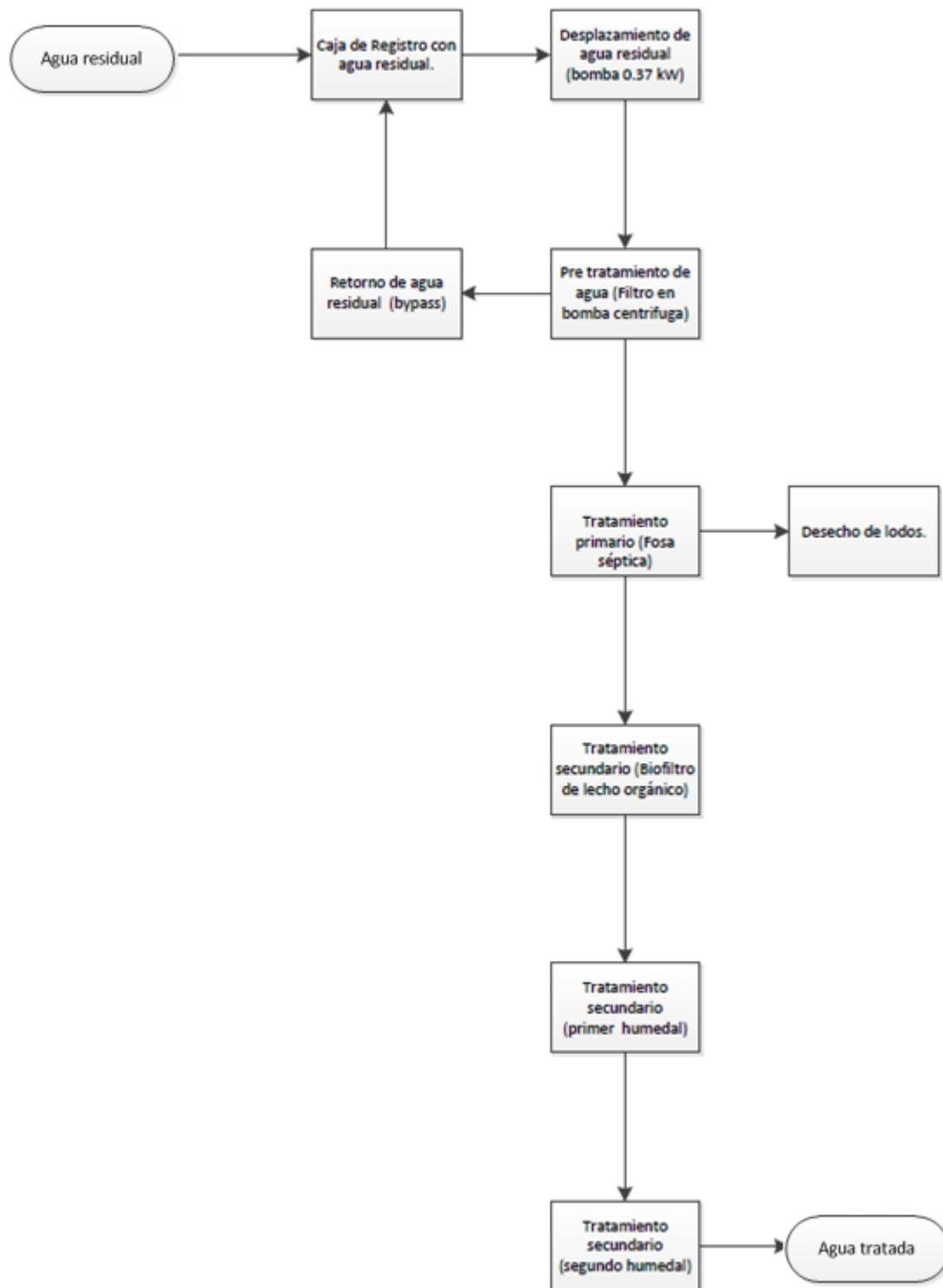


Imagen 6: Diagrama de proceso de tratamiento de agua residual

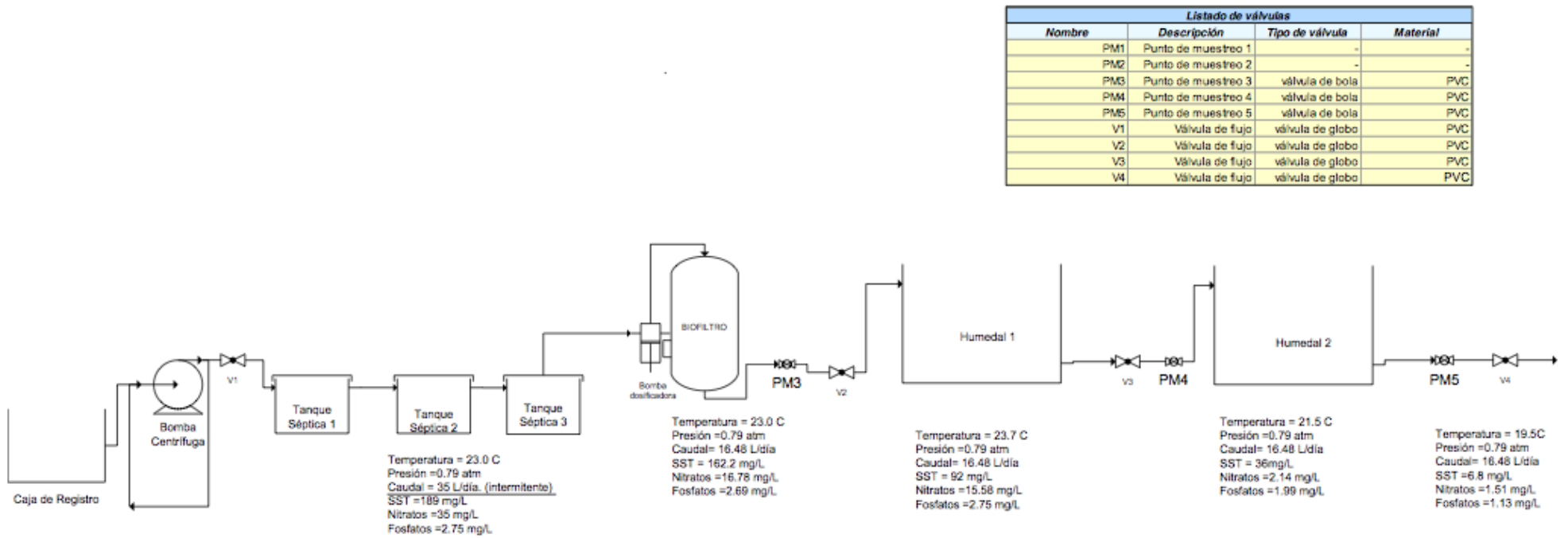


Imagen 7: Plano de distribución de sistema de tratamiento de agua residual.

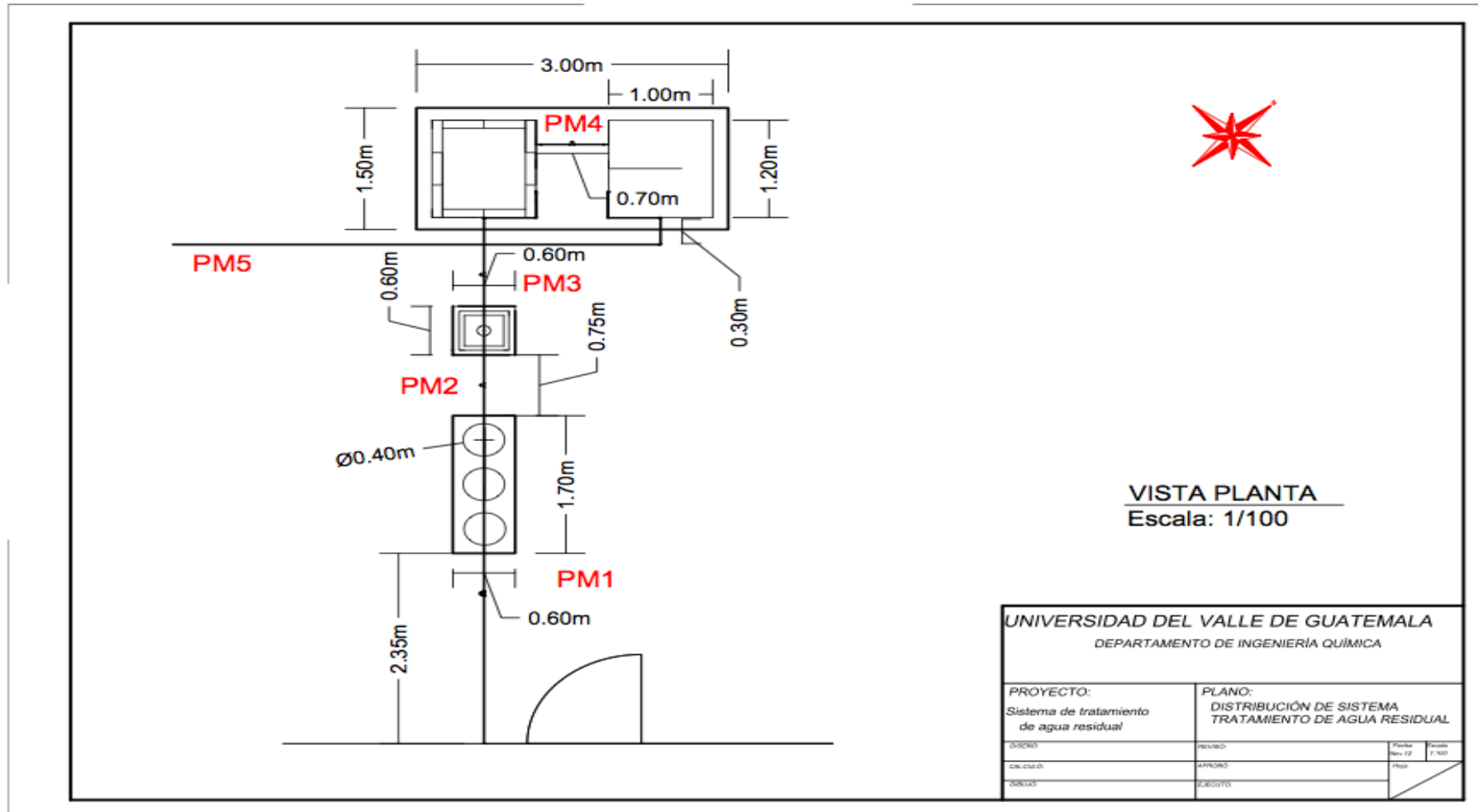


Tabla 4: Mediciones de pH en cada punto de muestreo.

pH (± 0.01)					
Punto de Muestreo	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 63
1	8.09	8.09	8.09	8.09	8.09
2	9.08	7.38	7.83	7.92	8.19
3	7.38	6.9	7.24	7.1	7.12
4	8.1	7.22	7.73	7.42	7.99
5	8.35	7.4	7.9	7.62	8.27

* Ver diagrama de flujo (Página 48 de Sección de Resultados).

Tabla 5: Porcentaje de cambio de pH (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio (Día 14)	Porcentaje de cambio (Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 28)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica (PM2)	-12%	9%	3%	2%	-1%
Biofiltro (PM3).	19%	7%	8%	10%	13%
Humedal 1. (PM4)	-10%	-5%	-7%	-5%	-12%
Humedal 2. (PM5).	-3%	-2%	-2%	-3%	-4%
Eficiencia global	-3%	9%	2%	6%	-2%

Tabla 6: Valor promedio de pH para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Promedio pH	Eficiencia Promedio
Fosa séptica (PM1)	8.09	0%
Biofiltro (PM2).	8.08	12%
Humedal 1. (PM3)	7.148	-8%
Humedal 2. (PM4).	7.692	-3%
Salida Sistema (PM5)	7.908	
Eficiencia global		2%

- PM2 = Punto de muestreo 2.
- PM3 = Punto de muestreo 3.
- PM4 = Punto de muestreo 4.
- PM5 = Punto de muestreo 5.

Gráfica 1: pH obtenido para cada punto de muestreo.

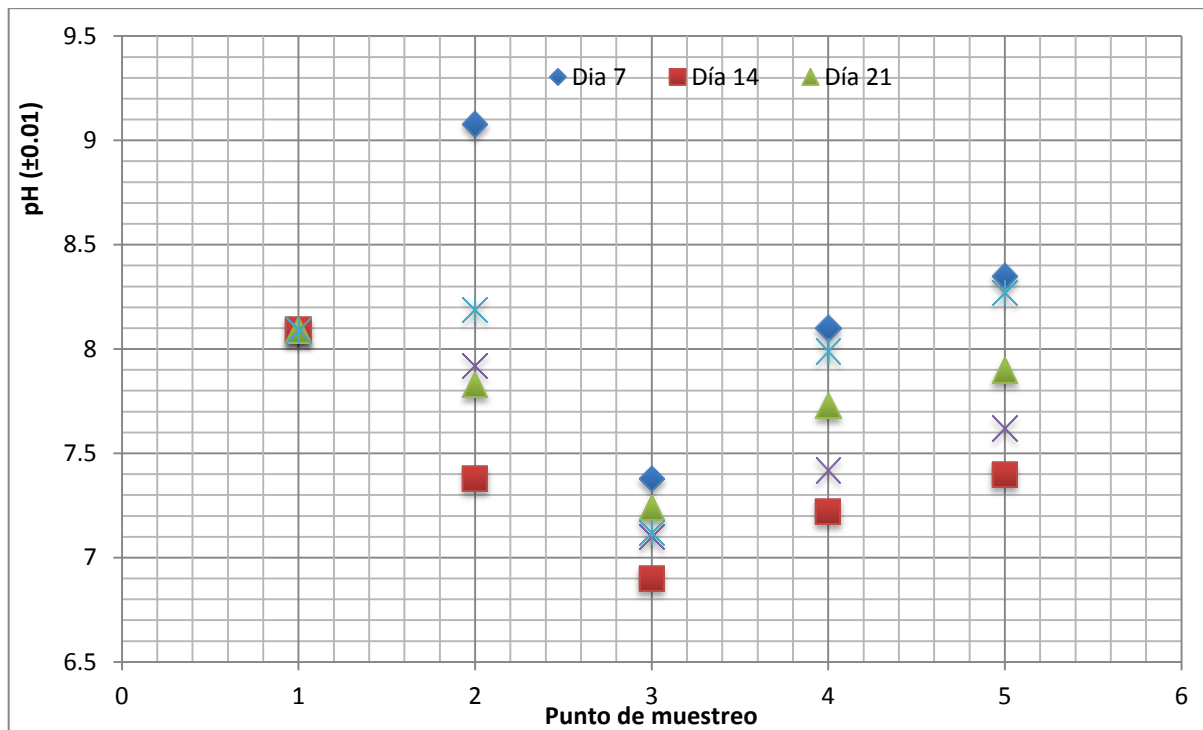


Tabla 7: Mediciones de SST en cada punto de muestreo.

Sólidos Suspendedos Totales(SST) (mg/L)(±0.01)					
Punto de muestreo	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 63
1	189	189	189	189	189
2	232	238	66	105	170
3	119	164	55	60	62
4	17	54	15	46	48
5	2	8	1	5	18

Tabla 8: Porcentaje de cambio de SST (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio(Día 14)	Porcentaje de cambio (Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 28)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica (PM2)	-23%	-26%	65%	44%	10%
Biofiltro (PM3).	49%	31%	17%	43%	64%
Humedal 1. (PM4)	86%	67%	73%	23%	23%
Humedal 2. (PM5).	88%	85%	93%	89%	63%
Eficiencia global	99%	96%	99%	97%	90%

Tabla 9: Valor promedio de SST para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Promedio SST	Eficiencia promedio
Fosa séptica (PM1)	189	14%
Biofiltro (PM2).	162.2	43%
Humedal 1. (PM3)	92	61%
Humedal 2. (PM4).	36	81%
Salida Sistema (PM5)	6.8	
Eficiencia global		96%

Gráfica 2: SST obtenido para cada número de muestra.

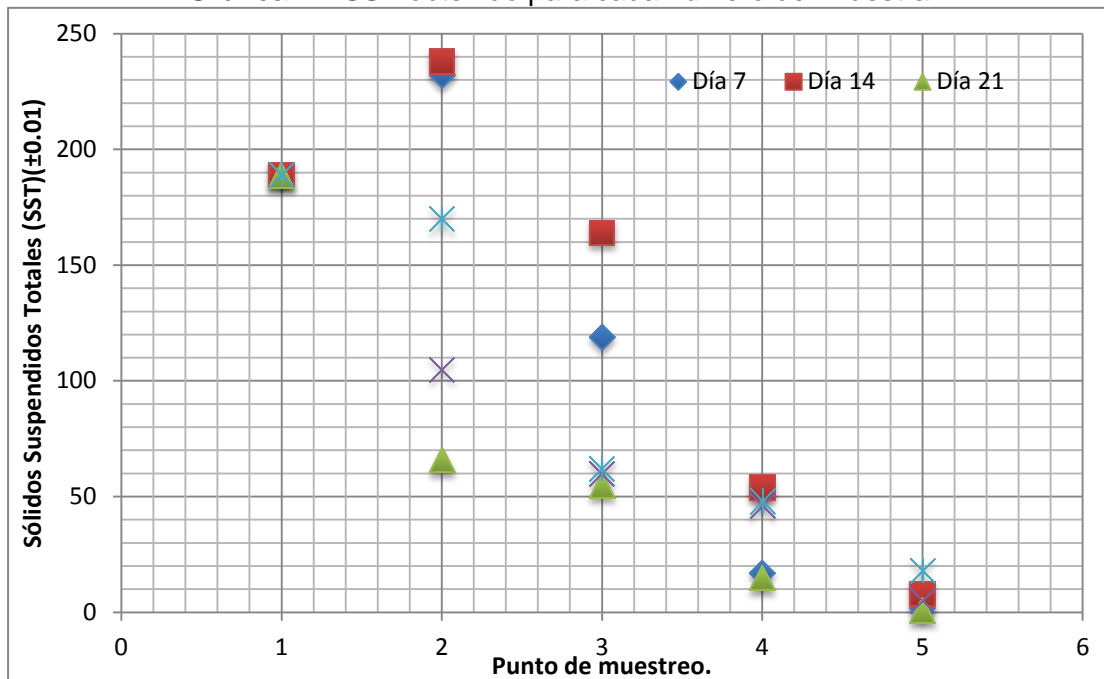


Tabla 10: Mediciones de nitratos en cada punto de muestreo.

Nitratos (NO ₃) (mg/L)(±0.01)					
Punto de muestreo	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 63
1	35	35	35	35	35
2	35	35	7.4	4.3	2.2
3	35	35	3.5	3.4	1
4	3.5	2.9	0.9	2.7	0.7
5	2.5	1.95	0.9	2.1	0.1

Tabla 11: Porcentaje de cambio de nitratos (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio(Día 14)	Porcentaje de cambio (Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 28)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica(PM2)	0%	0%	79%	88%	94%
Biofiltro(PM3)	0%	0%	53%	21%	55%
Humedal 1. (PM4)	90%	92%	74%	21%	30%
Humedal 2 (PM5)	29%	33%	0%	22%	86%
Eficiencia global	93%	94%	97%	94%	100%

Tabla 12: Valor promedio de nitratos para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Nitratos Promedio	Eficiencia Promedio
Fosa séptica (PM1)	35	52%
Biofiltro (PM2).	16.78	7%
Humedal 1. (PM3)	15.58	86%
Humedal 2. (PM4).	2.14	29%
Salida Sistema (PM5)	1.51	
Eficiencia global		96%

Gráfica 3: Concentración de nitratos obtenidos para cada muestra

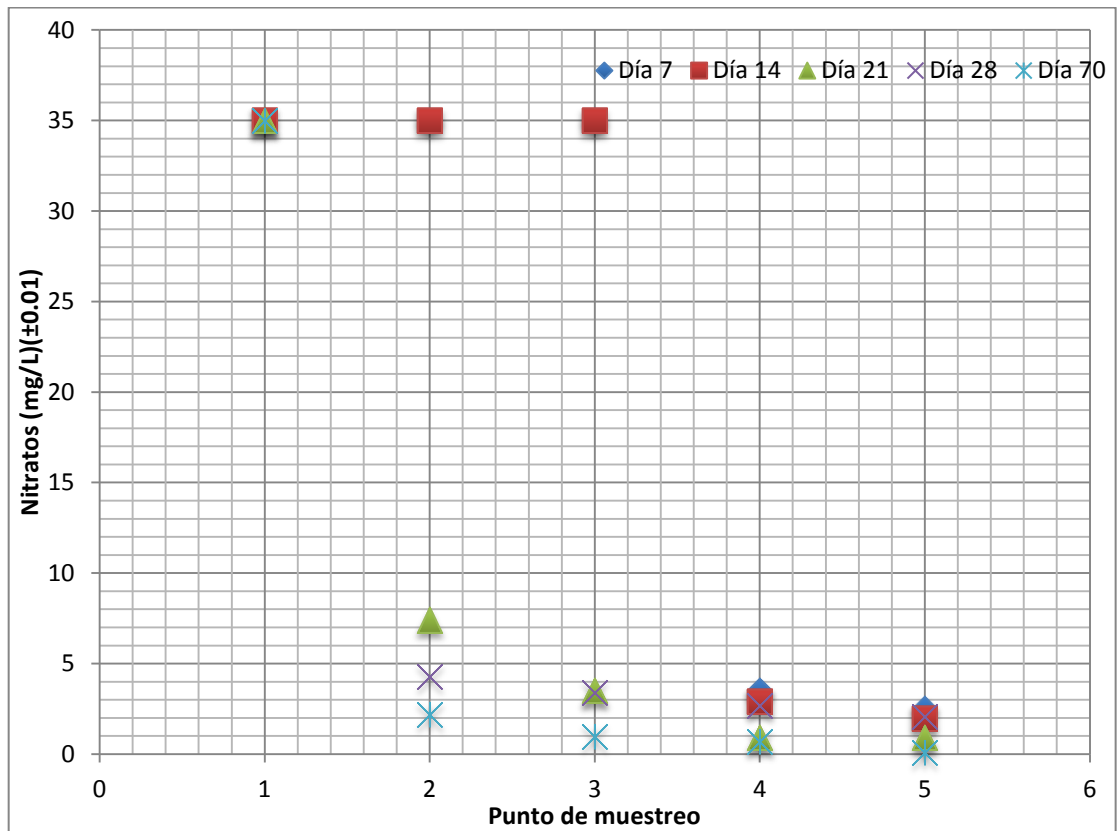


Tabla 13: Mediciones de fosfatos en cada punto de muestreo.

Fosfatos (PO₄)(mg/L)(±0.01)					
Punto de muestreo	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 63
1	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
2	2.75	2.75	2.47	2.75	2.75
3	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
4	1.81	1.71	1.77	2.75	1.93
5	0.92	0.86	0.87	2.45	0.53

Tabla 14: Porcentaje de cambio de fosfatos (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio(Día 14)	Porcentaje de cambio (Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 28)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica (PM2)	0%	0%	10%	0%	0%
Biofiltro (PM3).	0%	0%	-11%	0%	0%
Humedal 1. (PM4)	34%	38%	36%	0%	30%
Humedal 2. (PM5).	49%	50%	51%	11%	73%
Eficiencia global	67%	69%	68%	11%	81%

Tabla 15. Valor promedio de fosfatos para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Fosfatos Promedio	Eficiencia Promedio
Fosa séptica (PM1)	2.75	2%
Biofiltro (PM2).	2.694	-2%
Humedal 1. (PM3)	2.75	27%
Humedal 2. (PM4).	1.994	44%
Salida Sistema (PM5)	1.126	
Eficiencia global		59%

Gráfica 4: Concentración de fosfatos obtenido para cada muestra.

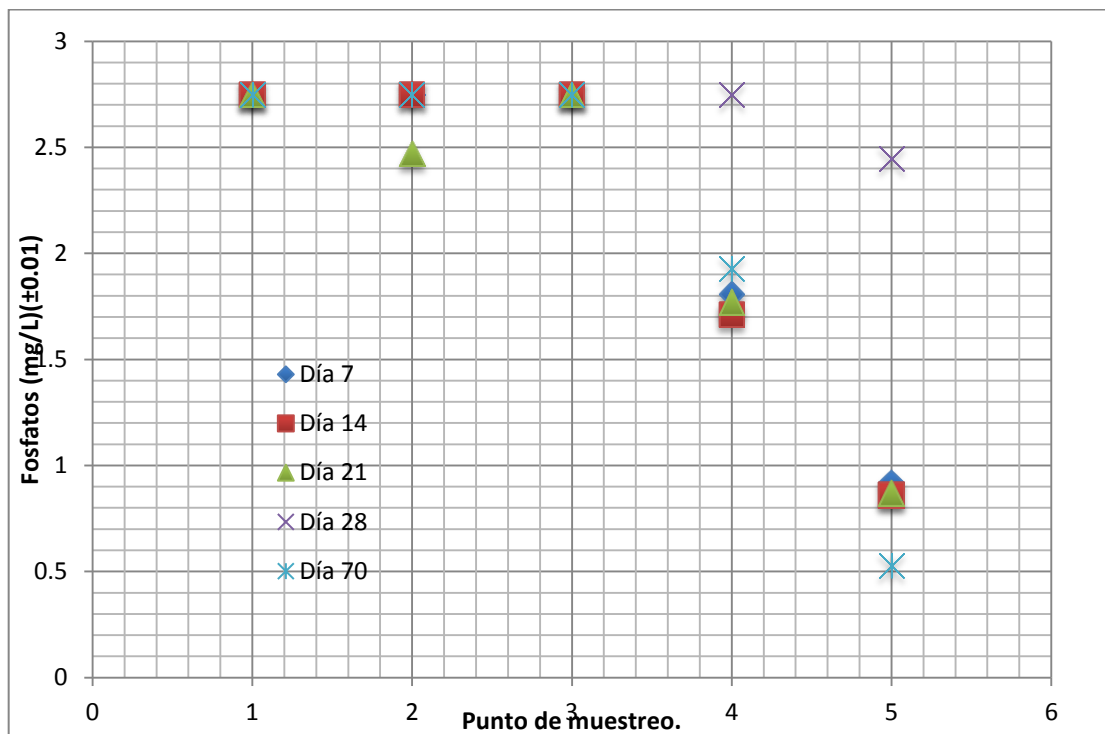


Tabla 16. Mediciones de conductividad en cada punto de muestreo.

Conductividad (μ Siemens/cm)(± 0.1)					
Punto de muestreo	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Día 63
1	712	-	712	712	712
2	634	-	510	834	594
3	906	-	691	707	611
4	366	-	619	576	630
5	299	-	516	485	472

Tabla 17: Porcentaje de cambio de conductividad (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio (Día 14)	Porcentaje de cambio (Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 28)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica (PM2)	11%	-	28%	-17%	17%
Biofiltro (PM3).	-43%	-	-35%	15%	-3%
Humedal 1. (PM4)	60%	-	10%	19%	-3%
Humedal 2. (PM5).	18%	-	17%	16%	25%
Eficiencia global	58%	-	28%	32%	34%

Tabla 18. Valor promedio de conductividad para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Conductividad Promedio	Eficiencia Promedio
Fosa séptica (PM1)	712	10%
Biofiltro (PM2).	643	-13%
Humedal 1. (PM3)	728.75	25%
Humedal 2. (PM4).	547.75	19%
Salida Sistema (PM5)	443	
Eficiencia global		38%

Gráfica 5: Conductividad obtenida para cada muestra.

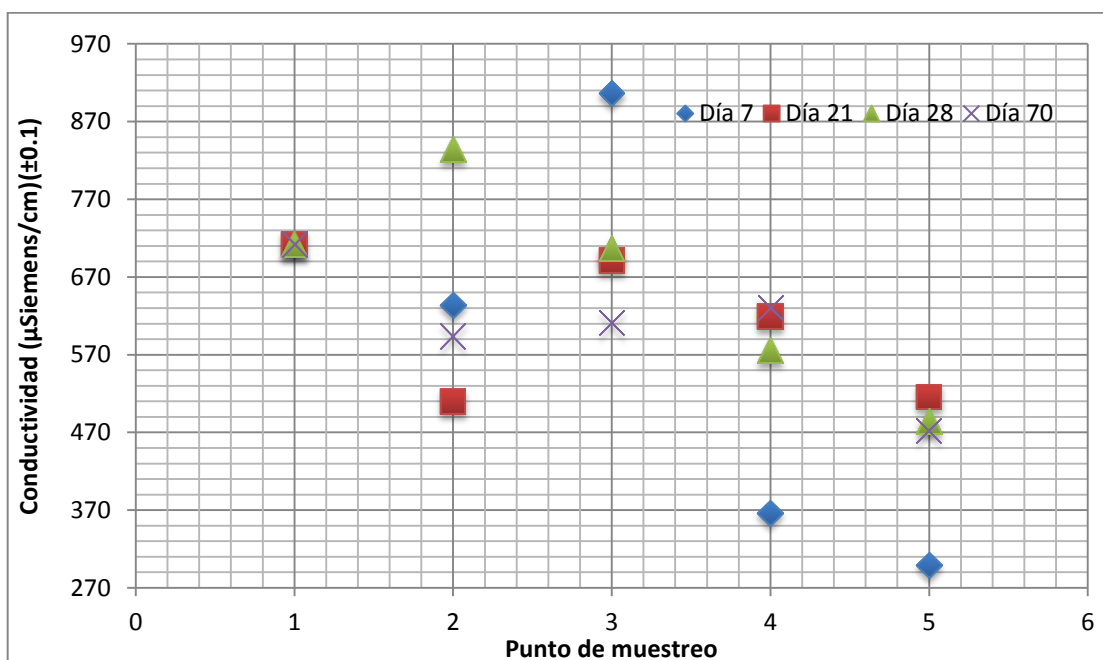


Tabla 19: Mediciones de DBO₅ en cada punto de muestreo.

DBO (mg/L)(±0.01)			
Punto de muestreo	Día 14	Día 21	Día 63
1	451	451	451
2	233.4	96.3	79.3
3	574.2	253.0	53.3
4	214.8	45.0	47.7
5	141	27.7	45.7

Tabla 20: Porcentaje de cambio de DBO_5 (aumento o disminución) para cada equipo.

Sistema	Porcentaje de cambio (Día 7)	Porcentaje de cambio(Día 21)	Porcentaje de cambio (Día 63)
Fosa séptica (PM2)	48%	79%	82%
Biofiltro (PM3).	-146%	-163%	33%
Humedal 1. (PM4)	63%	82%	11%
Humedal 2. (PM5).	34%	39%	4%
Eficiencia global	69%	94%	90%

Tabla 21: Valor promedio de DBO_5 para cada sistema y eficiencia global del sistema.

Sistema	Promedio DBO_5	Eficiencia Promedio
Fosa séptica (PM1)	451.0	70%
Biofiltro (PM2).	136.4	-115%
Humedal 1. (PM3)	293.5	65%
Humedal 2. (PM4).	102.5	30%
Salida Sistema (PM5)	71.4	
Eficiencia global		84%

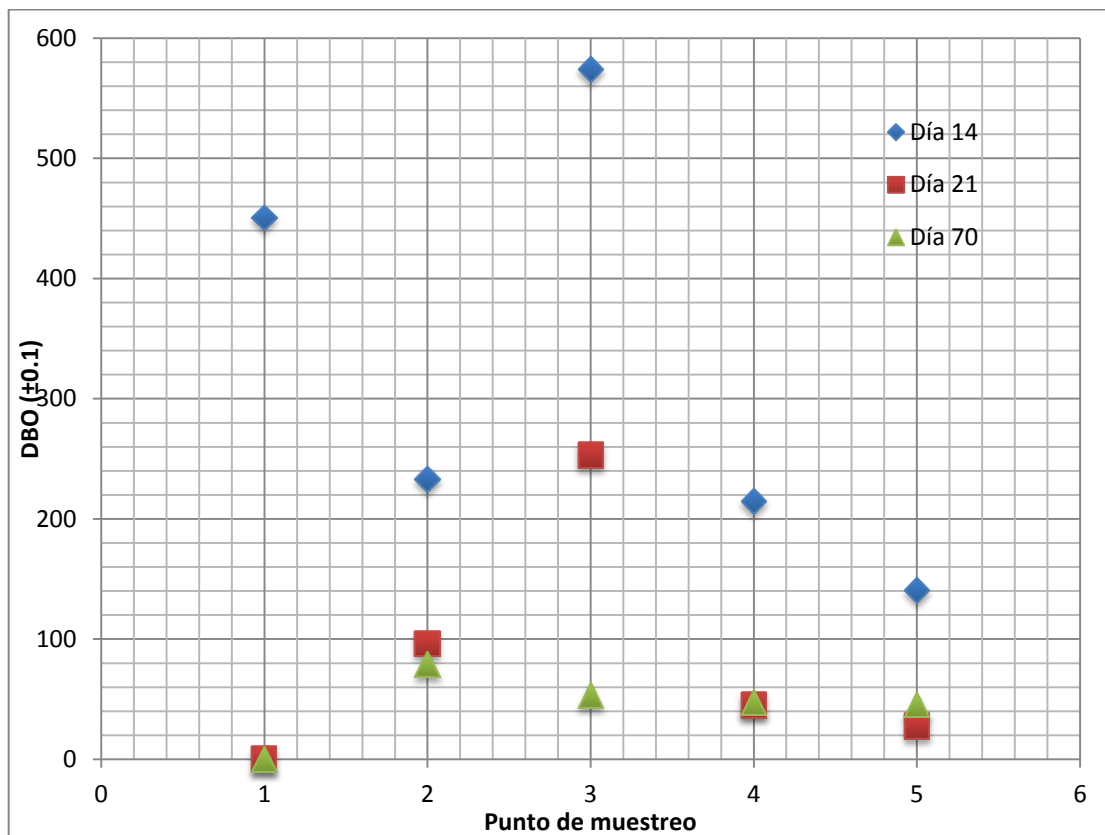
Gráfica 6: DBO₅ obtenida para cada muestra.

Tabla 22: Costos de material, equipo e instalación del sistema de tratamiento de agua residual.

Equipo o material	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Reductores Bushing Hierro Galvanizado 2"X1/2"	2	Q 36.00	Q 72.00
Tanque de Polipropileno 1m3	2	-	-
Metros cúbicos de piedrín (1-5 cm de diámetro)	2	Q 115.00	Q 230.00
Piedra grande		-	-
Plantas Cola de caballo	6	Q 20.00	Q 120.00
Plantas Cartucho Blanco	6	Q 25.00	Q 150.00
Costo Total de humedales			Q 572.00
Costo de equipos y sistemas auxiliares.	1	Q 23,916.74	Q 23,916.74
Costo de instalación (Mano de obra)			Q 6,018.85
COSTO TOTAL			Q 30,507.59

IX. DISCUSIÓN

Con el objetivo de reducir las concentraciones de sólidos suspendidos, pH, fosfatos, nitratos, conductividad y la demanda biológica de oxígeno en el agua residual, se diseñó, construyó y evaluó un sistema de tratamiento de agua residual empleando dos humedales de flujo subsuperficial con plantas emergentes.

El sistema de tratamiento de agua consta de varias etapas, en las que se lleva a cabo un pre-tratamiento, en donde por medio de un filtro en la entrada de la bomba centrífuga, se limita el ingreso de la mayor cantidad de sólidos de gran volumen. Este filtro evita que la tanto la bomba centrífuga, como toda la tubería empleada 0.0127m. (PVC 1/2") pueda taparse y el agua pueda dejar de llegar al sistema de tratamiento.

El recorrido de agua por la tubería de PVC es de 50m, (ver Imagen 7. Plano de distribución de área recreativa de Edificio de Los Colegio Profesionales), donde ingresa a un tratamiento primario, el cual consta de una fosa séptica construida con 3 cubetas plásticas de 40L de capacidad. En este tratamiento primario, se remueven cierta cantidad de sólidos suspendidos, grasas y aceites, en caso que existan en el agua a tratar. Por una diferencia de densidades, los sólidos suspendidos se depositan en la parte inferior de las cubetas de plástico, mientras las grasas y aceites ascienden formando una capa delgada transcurrida algunos días desde su operación. El sistema emplea el principio de vasos comunicantes, donde un conjunto de recipientes comunicados, y que contienen un líquido homogéneo en reposo, alcanza un mismo nivel en todos los recipientes, sin importar la forma y volumen de los mismos.

Del dimensionamiento del biofiltro, se tiene que el caudal teórico a tratar de agua residual es de $0.00335 \text{ m}^3/\text{ día}$ (3.35 L/día). No obstante, el sistema fue calibrado para trabajar con un caudal de $0.01648 \text{ m}^3/\text{ día}$ (16.48 L/día) para tener un mejor control de los flujos y aprovechar el equipo requerido. Para los humedales, con el método Kadlec y Knight, (1996) se calculó el área de cada humedal (ver sección de

Cálculo de muestra- Dimensionamiento de humedal de flujo subsuperficial). Para los dos parámetros utilizados para todo el dimensionamiento del sistema (DBO y SST), el valor del área del humedal necesaria para tratar las concentraciones de agua en el influente fue de 0.038m^2 y 0.002m^2 respectivamente. Por ajustes de equipo, el área real por cada humedal fue de 0.6 m^2 , permitiendo la distribución de mejor forma del espacio entre las plantas y ayudando a un mejor crecimiento de las mismas.

Tomando los parámetro de DBO y SST nuevamente, el caudal de agua residual máximo a tratar en cada humedal es de $0.26\text{ m}^3 / \text{día}$ (261.28L/día) y $5.29\text{ m}^3 / \text{día}$ $5,287.78\text{ L/día}$ respectivamente. Nuevamente se muestra que la capacidad de tratar agua de los humedales es mayor en comparación al biofiltro. Por lo tanto, es necesario trabajar con el caudal establecido por el biofiltro ya que éste puede saturarse, taparse y no trabajar en sus condiciones óptimas de operación, disminuyendo su eficiencia de remoción de contaminantes y tiempo de vida.

Así mismo, se determinó el volumen real del humedal, el cual incluye la diferencia entre el nivel del agua y el porcentaje de porosidad (50%) o volumen de espacios vacíos del piedrín dentro del tanque. En la Tabla 3 de la sección de resultados, se muestra el volumen real del humedal, de 0.36m^3 y el caudal máximo de $5.29\text{ m}^3/\text{día}$ ($5,290\text{ L/día}$). Otros de los parámetros calculados es el tiempo de retención hidráulica (TRH) de 14.62 días que es el tiempo que tarda en recorrer toda el agua cada humedal, la carga hidráulica del humedal (CH) de 1.7409 m/día que es la altura del agua en los humedales por día y las cargas orgánicas superficiales de $0.7851\text{ kg DBO/m}^2 \cdot \text{día}$, que indican la carga de materia orgánica que soporta la tecnología.

Los costos de instalación del sistema, se determinaron en base a todo el equipo utilizado y la mano de obra empleada para la construcción y preparación del terreno, instalación del equipo, supervisión del trabajo y trámites administrativos requeridos. El costo de materiales y equipo de los dos humedales fue de Q. 572.00, mientras el costo total de instalación y equipo de todo el sistema de tratamiento de agua fue de Q 30,507.59. (Ver Tabla 22 de la sección de Resultados). Los costos de mano de obra, se calcularon en base al trabajo realizado y la cantidad de personas necesarias en cada trabajo. El total de horas trabajadas se multiplico por Q8.50 que es el salario mínimo por hora de mano de obra para trabajos no agrícolas y por la

cantidad de trabajadores. Adicionalmente, se agregó el 46% que requiere la ley por las prestaciones, dando un total de Q6, 018.85 de mano de obra.

El factor económico es uno de los más importantes en estas tecnologías, ya que no requiere altos consumos de energía eléctrica, no requiere de aditivos o compuestos químicos, un control operacional riguroso y la mayor cantidad de equipos no representan una inversión alta.

Luego de arrancado el sistema, se dejó un tiempo de 7 días para que el agua residual empiece a recorrer todo el equipo instalado (proceso de estabilización). A los 7 días de operación del sistema, se realizaron los primeros análisis de agua, en donde se evaluaron los parámetros de pH, conductividad, DBO, Sólidos suspendidos, fosfatos y nitratos (ver Tablas No.4-11 De la sección de resultados).

Los resultados obtenidos, muestran que el pH tuvo un aumento entre el punto de muestreo 1 y 2 para el día de operación 7, debido que el sistema aún no estaba estabilizado. Del día 14 de operación en adelante, se observa que el pH disminuye a medida que recorre el sistema, tal y como se esperaba para el tratamiento de agua. En el punto de muestreo 4 y 5, se observa un aumento nuevamente en el pH debido a que inicialmente los humedales se llenaron con agua potable y se fueron dosificando con agua residual, por lo que lo analizado inicialmente fueron altas concentraciones de agua potable. Para el día de operación 63 ocurrió el mismo comportamiento de los valores de pH (ver Tabla 4) acercándose los valores a un pH neutro. El comportamiento se observa de mejor forma, en la Gráfica No.1, donde se espera que a medida que el sistema estabilice, el valor de pH del agua vaya disminuyendo hasta acercarse a un valor neutro (cercano a 7).

El porcentaje de eficiencia de remoción promedio de cada contaminante se obtuvo con un promedio de todos los valores obtenidos en cada día de análisis y la relación entre la entrada y la salida de cada parámetro analizado. Para el Humedal 1, la eficiencia de remoción promedio de pH fue de -8% mientras que para el Humedal 2 fue de -3%, hasta el día 63 de operación. (Ver Tabla No.5). Esto se debe a que el sistema no se encuentra estabilizado con agua residual y se tienen todavía altas concentraciones de agua potable. Sin embargo, se tiene una eficiencia de remoción global de pH para todo el sistema de 2%, siendo la mayor disminución en el biofiltro.

Para el parámetro de sólidos suspendidos totales, desde el análisis en el día 7 de operación, se tuvo un descenso considerable. En la Tabla No.6, se muestra como los sólidos fueron disminuyendo a medida que pasaban por cada sistema, lo cual indica que se está operando adecuadamente para reducir la mayor cantidad de sólidos suspendidos. En su mayoría, estos sólidos se quedan atrapados en el material filtrante del biofiltro (ficus) y otra parte en el piedrín depositado en los humedales. Para los resultados en el día de operación 21, se muestra el mismo comportamiento y la relación se ve de mejor forma en la gráfica No.2. En comparación al día 7, el día 14 la cantidad de sólidos aumento en los humedales por el proceso de estabilización del agua potable. Para los días 21 y 28, se observa pequeñas concentraciones de SST en el agua. El porcentaje de remoción hasta el día 63 fue de 61% para el humedal 1 y de 81% para el humedal 2 teniendo una eficiencia de remoción global de 96%, lo cual muestra el buen funcionamiento del equipo. Sin embargo, conforme transcurra el tiempo, se estima que la eficiencia de remoción de SST disminuirá, ya que el sistema empezará a saturarse, haciendo que no se reduzcan como en el inicio de la operación. Es por esto, que éste tipo de tecnología tiene un tiempo de vida definido.

La conductividad, es una medida indirecta de sólidos suspendidos y de iones Ca^+ y Mg^+ presentes en el agua residual (también conocido como dureza del agua). Se espera que la conductividad disminuya a medida que recorre el sistema, comportamiento que no se refleja en los primeros días de operación, ya que al salir del biofiltro, la conductividad en el agua aumentó. Esto se debe a la transferencia de iones que existe entre el agua y el piedrín ubicado en la parte inferior del biofiltro. Mismo comportamiento al ingresar a los humedales, donde el piedrín y piedra de río transfieren sus iones al agua. (Ver Tabla No.12).

La eficiencia de remoción de iones Ca^+ y Mg^+ , basados en la conductividad fue de 25% para el humedal 1 y de 19% para el humedal 2, mientras que la eficiencia de remoción global en todo el sistema fue de 38%, siendo la mayor disminución en el humedal 1, demostrando que el sistema si está suavizando el agua residual.

Otros de los parámetros importantes determinados en los análisis de agua fue la cantidad de nitratos y fosfatos presentes. Esto son nutrientes esencial para plantas y animales. Durante el proceso del humedal, las plantas acuáticas toman el fósforo inorgánico disuelto presentado como fosfatos provenientes del agua residual y lo

convierten en fosforo orgánico. El fosforo absorbido por las plantas sufre una descomposición bacteriana donde se convierte nuevamente en fosforo inorgánico (ciclo del fósforo). El ciclo del fosforo descrito indica que debe de existir una disminución considerable de nutrientes, principalmente dentro de los humedales, resultados que se muestran en la Tabla 10 y Tabla 11 y Grafica No.4, donde se observa que a medida que el sistema se estabiliza, las concentraciones de fosfato son menores.

Para el caso de los nitratos, éste es un indicador de la remoción de nitrógeno durante el tratamiento terciario en los humedales. La mayor parte del nitrógeno, luego del paso por el biofiltro (tratamiento secundario), está en forma de amonio. Este ion amonio puede ser oxidado completamente hasta nitrato por las bacterias nitrificantes (proceso de nitrificación), por lo que a medida que las plantas del humedal absorben el ion amonio, la cantidad de nitratos debe de reducirse.

Los resultados de nitratos presentes se muestran en las Tabla 8 y Tabla 9 según el día de operación del sistema, por lo que se espera que éste continúe disminuyendo a medida que el sistema llega a un equilibrio. Para la determinación del nitrato y el fosfato, fue necesario realizar diluciones de 1:5 en los puntos de muestreo 1 al 3, ya que como se puede observar en el día de operación 14, los valores sobrepasan el límite que permite leer el equipo empleado. Ya en las muestras en el día de operación 21, se observa un valor más exacto de nitratos y fosfatos en dichos puntos de muestreo. El porcentaje de remoción promedio de nitratos y fosfatos fue de 86% y 27% respectivamente para el humedal 1 y de 29% y 44% para el humedal 2.

El diagrama de flujo (Imagen 6. Sección de Resultados), se observan los flujos en cada equipo, las temperaturas determinadas en cada punto, la presión a la que se está operando sólidos suspendidos y nutrientes (NO_3 y PO_4) se reducen en cada tecnología haciendo que el sistema opere de forma óptima.

La demanda Química de oxígeno (DQO) no fue posible determinarla en los puntos de muestreo del sistema, ya que el equipo que se tenía disponible no era capaz de determinar tal parámetro de reducción de contaminación. Así mismo, es necesario tener estabilizado totalmente los humedales y que esté trabajando adecuadamente para que el análisis sea el correcto.

Los resultados obtenidos de los análisis de agua residual se compararon con el Artículo 20. Límites máximo permisibles de descargas a cuerpos receptores, del Acuerdo Gubernativo 236-2006, a fin que la planta cumpla, como mínimo, con tales parámetros.

Para Sólidos suspendidos totales, en 2 de mayo del 2011 se debía de cumplir con 600 mg/L, mientras que para el 2 de mayo de 2015, el valor debe de ser menor a 400 mg/L. El agua tratada cumple con los parámetros ya que el valor más alto de este parámetro fue de 232 mg/L para el día 14 de operación. En general, el cumplimiento del parámetro se tiene hasta el 2 de mayo de 2024, donde el acuerdo exige valores de SST menores a 100 mg/L.

Para el potencial de hidrógeno (pH), el artículo exige valores entre 6 a 9, los cuales se cumplen en el sistema de tratamiento de agua, ya que el valor más alto obtenido de pH es de 8.09 y éste disminuye a medida que el agua recorre el sistema, hasta un valor neutro cercano a 7.

Para la demanda biológica de oxígeno (DBO), el acuerdo gubernativo 236-2006 permite hasta el dos de Mayo de 2015 un valor de 750 mg/L por lo que con todos los datos obtenidos, el sistema cumple con tal valor. Sin embargo para el dos de mayo de 2020, es necesario cumplir con 450 mg/L, observando que la muestra inicial sobrepasa dicho valor. Sin embargo, se observan valores más bajos mientras el agua recorre el sistema teniendo un DBO de 27.7 mg/L en la salida para el día de operación 21. Por lo tanto, con los datos obtenidos el sistema cumple con el reglamento del acuerdo gubernativos 236-2006.

X. CONCLUSIONES

1. La menor área total requerida del humedal para reducir los niveles de contaminantes en un 90% en el agua residual durante el tratamiento, según el método de Kadlec y Knight, es de 0.002 m².
2. El caudal de agua residual posible a tratar por parte de cada humedal de flujo subsuperficial es de 5.29 m³/ día (5287.78 L/día.) Sin embargo, se empleó 0.001648 m³/ día (16.48 L/día) debido a que es el caudal que soporta el biofiltro que trata el agua previa al humedal.
3. El tiempo de retención hidráulica de cada humedal es de 14.63 días y la carga hidráulica de cada humedal es de 1.7409 m/día.
4. Las cargas orgánicas superficiales de cada humedal es de 0.7851kg DBO/(m²* día) respecto a los parámetros de DBO determinados.
5. Se obtuvo un porcentaje de remoción promedio global de sólidos suspendidos totales de 90% para el día 63 de operación, con respecto a la cantidad de sólidos suspendidos que ingresan al sistema proveniente de la caja de registro de agua residual.
6. Para el día 63 de operación, el pH en los humedales aumentó debido al agua potable presente durante la etapa de estabilización que tuvo el humedal, por lo que se obtuvo un porcentaje de cambio de -12% y -3% en los valores. La eficiencia global promedio de todo el sistema fue de 2%.
7. Para nitrato en el día 63 de operación, el porcentaje de cambio en el humedal 1 y humedal 2 fue de 61% y 34% respectivamente. Por lo tanto, la eficiencia promedio para ambos humedales fue de 58% con respecto a las concentraciones de nitratos que ingresan a cada humedal.
8. Para el fosfato en el día 63 de operación, el porcentaje de cambio en el humedal 1 y humedal 2 fue de 30% y 73% respectivamente. Este cambio fue con respecto a los valores de entrada y salida de cada humedal.
9. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el humedal 1 disminuyó en un 11% y un 4% en el humedal 2 para el día 63 de operación, obteniendo un porcentaje de disminución global de 84% para todo el sistema de tratamiento, demostrando la eficiencia del sistema para reducir la demanda bioquímica de oxígeno respecto a la entrada del sistema.

10. El costo de equipo empleado para los humedales fue de Q 572.00, mientras el costo total de instalación del sistema de tratamiento de agua fue de Q.30, 507.59.
11. Según los límites permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores del acuerdo gubernativo 236-2006 el sistema cumple con los parámetros finales.

XI. **RECOMENDACIONES**

1. Realizar limpiezas mensuales a la bomba centrífuga y a la tubería y accesorios de PVC para evitar la acumulación de sólidos y que éste pueda taparse.
2. Profundizar la caja receptora de agua residual proveniente del Edificio de los Colegio Profesionales para aumentar el volumen de agua y permitir que los sólidos de gran tamaño se asienten.
3. Continuar monitoreando el sistema de tratamiento de agua residual durante 2 años con el fin de obtener una mayor cantidad de datos e información.
4. Divulgar los datos e información obtenida con el fin de crear un impacto social que beneficie a las comunidades de Guatemala.
5. Rotar las plantas en los humedales y sembrarlas en áreas recreativas, con el fin de aprovechar los nutrientes que posee el agua residual y que se puedan emplear ornamentalmente.

XII. BIBLIOGRAFÍA

1. APHA. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington. 1265 pp. Guatemala.
2. Capene, D. G., Popa, R., Flood, B., and Nealson, K. H. 2006. *Geochemistry. Follow the nitrogen*. *Science* 312(5774), 708-709.
3. Catalán Lafuente, José. “*Diccionario Técnico del Agua*”. Madrid España, 1975. Pág. 24.
4. Corzo, A. Et. Al. (2008) *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y exportación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
5. EPA. 1997. *Volunteer Stream Monitoring: A Methods Manual*. Hanna instruments DIST 3, HI98.303 manual. <http://www.epa.gov/owow/monitoring/volunteer/stream/>.
6. Gálvez J. (2007). *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales sector cuatro caminos y diseño del Mercado de la aldea el Pajon, Municipio de santa Catarina Pínula, Departamento de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala. http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7774.pdf
7. Garzón, M (2003). *La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
8. Gordon M. Fair, John C. Geyes, Daniel A. Okum. *Purificación de aguas y tratamientos y remoción de aguas residuales*, Editorial limusa, primera edición, 1973.
9. Kadlec, R. Knight. 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control Processes, Performance, Design and Operation* ISBN: 9781900222051 Pages: 156
10. Lara Borrero, J. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Master en Ingeniería y gestión ambiental tiempo completo. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Mayo 1999.
11. López, Irene. (2006). *El agua, un recurso estratégico para el desarrollo*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de trabajo social. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/15/15_1319.pdf.
12. Metacalf & Hedí, INC, *Ingeniería de aguas residuales*. Volúmenes 1 y 2, Ed. McGraw-Hill. Tercera edición 1995.

XIII. GLOSARIO

1. Agente contaminante: Son las sustancias cuya incorporación a un cuerpo de agua conlleva a su deterioro de calidad física, química y biológica.
2. Aguas negras: son las aguas provenientes del servicio sanitario.
3. Agua residual: Agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido degradada por la incorporación de agentes contaminantes.
4. Agua residual de tipo especial: Es el agua residual de tipo diferente al ordinario, que incluye la actividad industrial.
5. Agua residual de tipo ordinario: Es el agua residual generada por las actividades domésticas del ser humano.
6. Agua residual doméstica o sanitaria: Es aquella que se origina en los dispositivos sanitarios de instalaciones residenciales, comerciales, industriales e institucionales.
7. Ambiente: Conjunto de elementos bióticos y abióticos, y fenómenos físicos, químicos y biológicos que condicionan la vida, el crecimiento y la actividad de los organismos vivos. Generalmente se le llama medio ambiente.
8. Biofiltración: Consiste en hacer pasar los contaminantes del aire a un medio líquido a través de una columna de materia orgánica (biofiltro) humedecida, sobre la cual crecen microorganismos que se alimentan de estos contaminantes.
9. Caja de registro: Permite la conexión entre alcantarillas y el acceso a las mismas para su limpieza.
10. Caudal: Volumen de agua por unidad de tiempo. Usualmente expresado en m³/ día o L/día.

11. **Coliformes fecales:** Es un indicador de la contaminación por aguas negras, ya que se encuentran comúnmente en las heces humanas y animales. Estos indican la posible presencia de patógenos (causantes de enfermedades), bacterias, virus y protozoos que también habitan en el sistema digestivo de humanos y animales.
12. **Conductividad:** Es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Es una medida indirecta de la cantidad de iones en una solución.
13. **Consumo:** Cantidad de agua asignada a una persona por unidad de tiempo.
14. **Contaminación:** Es un término general que significa la introducción al agua de microorganismos, que hacen el agua impropia al consumo humano, generalmente se considera que implica la presencia o posible presencia de bacterias patógenas.
15. **Control (ambiental):** Vigilancia y seguimiento (monitoreo externo) periódico y sistemático sobre el desarrollo y la calidad de procesos, comprobando que se ajustan a un modelo preestablecido, sinónimo de fiscalización ambiental.
16. **Cuerpo de agua:** Acumulación de agua corriente o quieta, que en su conjunto forma la hidrósfera; son los charcos temporales, esteros, manantiales, marismas, lagunas, lagos, mares, océanos, ríos, arroyos, reservas subterráneas, pantanos y cualquier otra acumulación de agua.
17. **Cuerpo receptor:** Es el río, quebrada, lago o mar que implica la presencia o posible presencia de bacterias patógenas.
18. **DBO:** La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medición empírica de los requerimientos de oxígeno para aguas cloacales y residuales municipales e industriales.
19. **Descarga:** Vertido de agua residual o de líquidos contaminantes al ambiente durante un periodo determinado o permanente.

20. Desecho: Denominación genérica de cualquier tipo de productos residuales o basuras procedentes de las actividades humanas o bien producto que no cumple especificaciones. Sinónimo de residuo.
21. Diseño de sitio: Es el plano de ingeniería en el cual se indica toda la infraestructura interrelacionada con una obra a desarrollar, se hace a una escala donde se muestren todas las obras a construir y existentes con los retiros a colindancias y cuerpos de agua.
22. Disposición final: Es el punto de descarga final del agua que ha sido tratada anteriormente.
23. Efluente del sistema de tratamiento: En el manejo de aguas residuales, es el caudal que sale de la última unidad de tratamiento.
24. Flujo de entrada: Es el agua que entra a las alcantarillas desde la superficie, durante eventos de precipitación, a través de fisuras en el sistema, o a través de conexiones de tejados o drenajes de sótanos.
25. Fosa séptica: Es un tanque en el cual se vierten las aguas negras y servidas cuando se carece de alcantarillado sanitario para evacuar dichas aguas.
26. Humedales construidos: Son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas. El proceso de descontaminación tiene lugar mediante la interacción entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos y fauna.
27. Humedales de flujo sub superficial: Para este tipo de sistemas de tratamiento, la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas.
28. Humedales de flujo superficial: En los sistemas de flujo superficial el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula a través de los tallos y hojas de las plantas.
29. Influyente del sistema de tratamiento: Se refiere al caudal que ingresa a la primera unidad de tratamiento.

30. Límite permisible: Valor máximo de concentración de elemento(s) o sustancia(s) en los diferentes componentes del ambiente, determinado a través de métodos estandarizados, y reglamentado a través de instrumentos legales.
31. Muestra compuesta: Son dos o más muestras simples que se han tomado y se han mezclado en proporciones conocidas y apropiadas para obtener un resultado representativo de su calidad a intervalos de tiempo definidos.
32. Muestra simple: Es aquella muestra tomada en forma única y aislada para determinar la calidad del agua en un momento dado.
33. pH = Potencial de Hidrógeno. Es la medida de acidez o basicidad del agua.
34. Plantas emergentes: Tipo de vegetación empleada en los humedales para la remoción de contaminantes.
35. Pozo de extracción: También llamados pozos de inspección, están situados en los puntos en donde la tubería cambia de dirección o diámetro, cambio de pendiente, origen de tramo(cabeceras)
36. Pre tratamiento: El pre tratamiento se efectúa previo al tratamiento primario. El objetivo principal del pre tratamiento es eliminar los desechos muy grandes o voluminosos que puedan llegar a la planta de tratamiento
37. Proyecto: Conjunto de planos, cálculos y demás documentos pertinentes para la planificación y definición de la planta de tratamiento de aguas residuales.
38. Red: Es la distribución de acueductos y alcantarillas en base a un diseño.
39. Sedimentación: Es el proceso en donde los floculo se trasladan a tanque, donde por su propio peso se precipitan.

40. Sistema de tratamiento: Conjunto de operaciones y procesos físicos, químicos y/o biológicos, cuya finalidad es depurar la calidad del agua residual a la que se aplican.
41. Sistemas naturales: En mecanismos que logran la eliminación de sustancias o componentes contaminantes en las aguas residuales. Su principal característica es que no requieren de uso de energía externa ni aditivos químicos.
42. Sólidos suspendidos totales: La cantidad de sólidos totales en el agua residual, depende de los sólidos disueltos, como el calcio, cloruros, nitratos, fósforo, hierro, azufre y partículas que pasan a través de un filtro con poros de alrededor de 2 micras (0.002 cm) y de los sólidos en suspensión, que son partículas de arcilla, plancton, algas, restos orgánicos finos y otras partículas que no pasan a través de filtros de 2 micrones.
43. Tratamiento primario: Este tipo de tratamiento emplea procesos físicos o físico-químicos con el fin de remover los materiales que son posibles de sedimentar.
44. Tratamiento secundario: El objetivo es eliminar desechos y sustancias que con la sedimentación no se eliminaron y para remover las demandas biológicas de oxígeno. Con estos tratamientos secundarios se pueden eliminar las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos.
45. Tratamiento terciario: Consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus y compuestos orgánicos.
46. Vida útil: es el periodo de tiempo que las estructuras realizan su función en un 100%.

XIV. APÉNDICE

DATOS ORIGINALES.

Tabla 23: Valores utilizados para el cálculo de coeficiente de fricción f utilizando el método de Moody.

Datos para tubería PVC	Valor	Unidad
$L_{\text{tubería}}$	50	m
$d_{\text{internotubería}}$	0.0250	m
Densidad de agua ρ (a 25 C)	997	kg/m ³
Viscosidad dinámica μ (a 25C)	0.00089	Ns/m ²
Velocidad fluido u	3.0765	m/s
Gravedad	9.81	m/s ²
Rugosidad absoluta (PVC) (e)	0.0000015	

Tabla 24: Resultados de DBO inicial y DBO final y diluciones para cálculo de DBO₅ para el día de operación 14.

DÍA 14					
Punto de muestreo	DBO inicial (mg/L)	DBO final(mg/L)	Dilución	Resultado(mg/L)	
1	11.4	2.38	0.02	451	
2	9.57	5.68	0.0167	233.4	
3	9.79	0.22	0.0167	574.2	
4	10.45	6.87	0.0167	214.8	
5	9.63	7.28	0.0167	141	

Tabla 25: Resultados de DBO inicial y DBO final y diluciones para cálculo de DBO₅ para el día de operación 21.

DÍA 21					
Punto de muestreo	DBO inicial (mg/L)	DBO final (mg/L)	Dilución	Resultado (mg/L)	
1	-	-	-	-	
2	7.63	4.74	0.0300	96.3	
3	7.67	0.08	0.0300	253.0	
4	7.68	6.33	0.0300	45.0	
5	7.68	6.85	0.0300	27.7	

CÁLCULO DE MUESTRA

- Diseño de sistema de tratamiento
 - Dimensionamiento de tubería.

$$\frac{16.48 L}{dia} * \left(\frac{1m^3}{1000L}\right) * \left(\frac{1 día}{24 horas}\right) * \left(\frac{1 hora}{3600 s}\right) = 1.7 * 10^{-7} m^3/s$$

Velocidad lineal del agua= 1 m/s

$$A = \frac{1.7 * 10^{-7} m^3/s}{1 m/s} = 1.7 * 10^{-7} m^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 1.7 * 10^{-7} m^2}{\pi}} = 0.0004703 m = 0.01851 in.$$

Donde:

A = Área interna de la tubería

D = Diámetro de la tubería. (Ecuación No. 1)

Se trabajó con tubería de PVC de ½" para evitar la acumulación y taponamiento en la tubería producto de la cantidad de solidos a transportar.

A partir de la distancia, desde la salida de la bomba centrífuga 0.5 HP hasta la llegada a la primera fosa séptica, el volumen total de la tubería es:

$$V = \pi r^2 l_{tubería} = \pi \left(\left(\frac{0.5 in}{2}\right)\left(\frac{2.54cm}{1 in}\right)\left(\frac{1m}{100 cm}\right)\right)^2 (50 m) = 0.006333 m^3.$$

Dónde:

r = radio de tubería utilizado.

L_{tubería}= largo de tubería desde salida de bomba centrífuga hasta primera fosa séptica.

(Ecuación No. 2)

- Dimensionamiento de bomba centrífuga.

En base a los datos de la tubería de PVC de ½" utilizada para el transporte de agua residual por todo el sistema, se calculó con el método de Moody (1994) el coeficiente de fricción "f" en función del número de Reynolds (Re) y el coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería.

- Cálculo de rugosidad relativa

Rugosidad relativa = $e/d = 0.0000015/0.250 = 0.000006$.

Dónde:

e = rugosidad absoluta de PVC.

d = diámetro interno de la tubería.

- Cálculo de número de Reynolds

$$Re = \frac{v * dint * \rho}{\mu}$$

(Ecuación No. 3)

$$Re = \frac{3.076 \frac{m}{s} * 0.0250m * 997kg/m^3}{0.00089 \frac{kg}{ms}} = 8.62 * 10^4$$

Donde:

v = velocidad del fluido

$dint$ = diámetro interno de la tubería.

ρ = densidad del fluido.

μ = viscosidad del fluido.

Con el número de Reynolds obtenido, se concluye que se tiene un flujo turbulento ya que es menor a 2040.

Utilizando la Figura 5.11 de Sinnott 2008, se determinó el coeficiente de fricción f , teniendo el número de Reynolds (Nre) y rugosidad relativa (e/d).

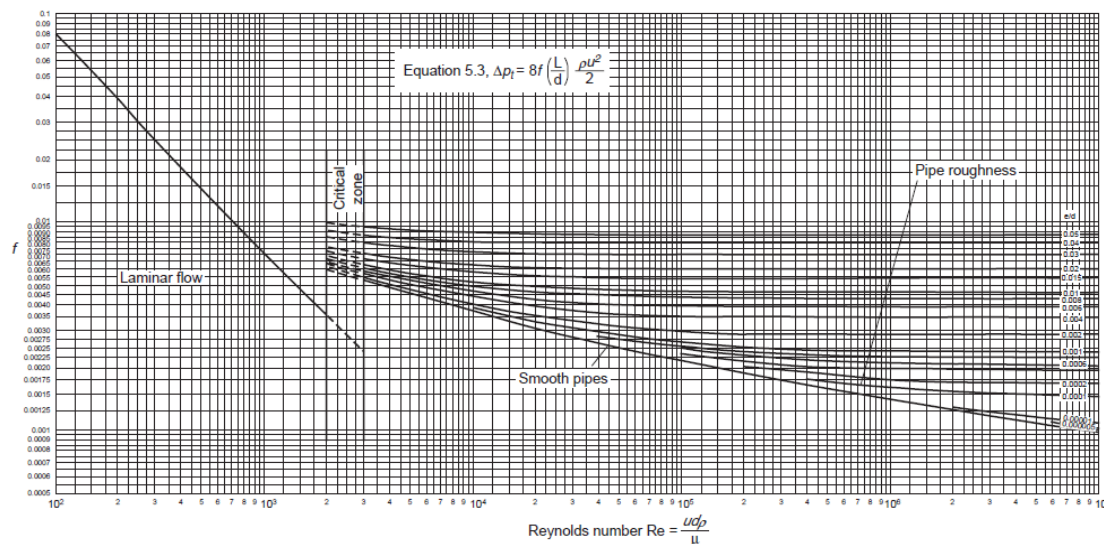


Figure 5.11. Pipe friction versus Reynolds number and relative roughness.

Por lo que el coeficiente de fricción “ f ” fue de 0.039.

- Área de sección transversal de tubería.

$$\text{área de sección transversal} = \frac{\pi}{4} (di)^2 = \frac{\pi}{4} (0.0250)^2 = 0.0004908 m^2$$

(Ecuación No. 4)

- Velocidad de cabeza.

$$\text{Velocidad de cabeza} = \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

v= velocidad del fluido

g= gravedad.

(Ecuación No. 5)

$$\text{Velocidad de cabeza} = \frac{(3.0765 \text{ m})^2}{2(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 0.4824 \text{ m/s}$$

- Pérdida de cabeza.

Para el cálculo de pérdida de cabeza de bomba, se determinó la cantidad de accesorio y válvulas empleadas para todo el proceso. Se utilizó la Tabla 5.3 de Sinnott 2008, para un flujo turbulento.

Tabla 26: Datos para cálculo de cabeza de bomba.

Tipo de válvula		Número de velocidad de cabeza	Número de diámetro equivalente.
Codo estándar 45		0.35	15
Codo radio largo 45		0.2	10
Codo estándar 90		0.6-0.8	30-40
Codo estándar largo 90		0.45	23
Tee		1.2	60
Uniones y acoples		0.04	2
Válvula de compuerta	Abierta completamente	0.15	7.5
	1/4 abierta	16	800
	1/2 abierta	4	200
	3/4 abierta	1	40
Válvula de globo.	Abierta completamente	9	450
	1/2 abierta	36	1800
	1/4 abierta	112	5600

(Obtenido de Sinnott, 2008)

- Cálculo de pérdida de cabeza

En la Tabla 27 de la sección de Datos Calculados, se muestra la cantidad de accesorios empleada para obtener la sumatoria del número de velocidad de cabeza

Pérdida de cabeza = velocidad de cabeza * sumatoria k
 Pérdida de cabeza = 0.4824 m/s * 235.16 = 113.44m

- Caída de presión por cabeza.

Caída de presión por cabeza = pérdidas de cabeza * ρ * g

Caída de presión por cabeza = 113.44m * 997 kg/m³ * 9.81 m/s² = 1,109,538.70 N/m²

- Caída de presión por fricción.

$$\Delta P_f = 8f \left(\frac{l_{tuberia}}{di} \right) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right)$$

(Ecuación No. 6)

$$\Delta P_f = 8(0.0039) \left(\frac{50 \text{ m}}{0.0250 \text{ m}} \right) \left(\frac{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (3.0765 \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2}{2} \right) = 294,417.48 \text{ N/m}^2$$

Donde:

f = coeficiente de fricción.

$l_{tuberia}$ = largo de tubería desde bomba centrífuga hasta primera fosa séptica.

- Caída de presión total.

Caída de presión total = perdida por cabeza + perdida de presión por fricción.

Caída de presión total = 1,109,538.70 N/m² + 294,417.48 N/m² = 1, 544,351.79 N/m²

Calculo de flujo másico de agua requerida para el sistema de tratamiento.

$$\frac{19.15L}{dia} * \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000L} \right) * \left(\frac{997 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ dia}}{86,400s} \right) = 0.0002210 \text{ kg/s}$$

- Cabeza de bomba

$$Cabeza \text{ de bomba} = \Delta z - \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta P_f}{\rho g}$$

(Ecuación No. 7)

$$Cabeza \text{ de bomba} = -1 \text{ m} - \frac{0}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{294,417.48 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 158.90 \text{ m}$$

Donde:

ΔPf = caída de presión por fricción.

Δz = diferencia de altura entre bomba centrífuga y fosa séptica.**

ΔP = cambio de presión.

ρ = densidad del fluido.

** Se tienen 1m de altura desde el centro de la bomba hasta la altura de entrada de la primera cubeta de la fosa séptica.

- Trabajo realizado por la bomba (Ecuación de Bernoulli)

$$g\Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} - \frac{\Delta Pf}{\rho} - W = 0$$

$$W = \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)(-1,0 m) + 0 - \frac{294,417.48 \frac{N}{m^2}}{997 \frac{kg}{m^3}} = -1558.8088 \frac{J}{kg}$$

Se asumen que la diferencia de presión es $\Delta P = 0$

- Potencia de bomba necesaria

$$potencia = \frac{W * m}{\eta}$$

(Ecuación No. 8)

$$Potencia = \frac{-1558.8088 \frac{J}{kg} * 0.000221 kg/s}{0.7} = 0.4921W = 0.0005 KW * \frac{1.341 HP}{1 W}$$

$$= 0.0007 HP$$

Donde:

W = Trabajo realizado por la bomba.

m = Flujo másico.

η = Eficiencia de la bomba.

- o Dimensionamiento de biofiltro de lecho orgánico.

Para el dimensionamiento de biofiltro, se utilizó las cargas máximas de DBO y SST (kg/m² día) y la concentración de los parámetros de DBO y SST esperados en el agua residual a tratar.

Tabla 27: Cargas máximas de DBO y SST para un biofiltro con aire y sin aire. (Basado en investigaciones previas en el IMTA de México).

Cargas máximas	DBO (kg/m ² día)	SST (kg/m ² día)
con aire	0.32	0.05
sin aire	0.1	0.035

Tabla 28: Capacidad máxima de agua residual a tratar en biofiltro según los parámetros de DBO y SST para un sistema con aire y sin aire.

Parámetro	Capacidad máxima de agua residual a tratar (DBO) (L/m ² *día)	Capacidad máxima de agua residual a tratar (SST)(L/m ² *día)
con aire	946.04	377.92
sin aire	295.6	264.55

Se determinó que se trabajará con un biofiltro de 5 pulgadas de diámetro (0.127 m), por lo que se calculó el área (m²) del biofiltro para un sistema con aire siendo 0.0127 m²

Finalmente, se calculó el caudal (L/día) para los parámetros de DBO y SST en un sistema con aire y en un sistema sin aire.

Tabla 29: Caudal máximo permitido en biofiltro según los parámetros de DBO y SST en un sistema con aire y sin aire.

Parámetro	caudal (DBO)(L/día)	caudal (SST) (L/día)
con aire	11.98	4.79
sin aire	3.75	3.35

En la Tabla 21. Se muestran los caudales para los parámetros establecidos. El sistema será con aire, por lo que el parámetros limitante es SST, ya que la capacidad máxima de nuestro sistema para tratar éste parámetro es menor en comparación al DBO, por lo que el caudal a utilizar es de 19.15 L/día.

- Dimensionamiento de humedal de flujo subsuperficial.

Tabla 30: Concentraciones de cada parámetro en la entrada al humedal y salida del humedal y porcentaje (%) de remoción de contaminantes esperado por el humedal.

Parámetro	AR humedal(mg/L)	Remoción Humedal (%)	Efluente(mg/L)
DBO	135.3	90%	13.53
DQO	186	70%	55.8
SST	52.92	90%	13
NT	21.2	40%	12.72
PT	10.5	20%	8.4
CF	1.2*10 ⁸	99%	1.2*10 ⁸

Tabla 31: Ecuaciones de regresión y constantes de primer orden para el dimensionamiento de humedales (Rousseaus, 2003)

k(m/año)	C* (mg/L)
180	10.67
3000	11.13
27	1.5
12	0.02
95	18

Para el dimensionamiento de humedales construidos de flujo subsuperficial, se emplean las siguientes ecuaciones de diseño.

Ecuación de diseño para humedal de flujo subsuperficial (Kadlec y Knight, 1996) (Ecuación No. 9).

$$\ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*}\right) = \frac{-k}{q}$$

Donde:

$$q = \frac{365Q}{A_s}$$

Por lo tanto,

$$A_s = \frac{365Q}{k_{20}} * \ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*}\right)$$

Donde:

A_s = área de humedal requerida (m²)

C_e = concentración de efluente (mg/ml).

C_i = concentración de influente (mg/ml)

C^* = constante de contaminante (mg/ml)

K = constante de velocidad de primer orden (m/año)

q = velocidad de la carga hidráulica (m/año)

Q = Caudal promedio en el humedal (m³/día). ***

Por lo tanto, se calculó el área del humedal requerida para el parámetro de DBO.

$$A_s = \frac{\left(28.73 \frac{L}{\text{día}}\right) * \left(\frac{1 m^3}{1000L}\right)}{\left(\frac{180m}{\text{año}}\right) * \left(\frac{\text{año}}{365 \text{ días}}\right)} * \ln\left(\frac{135.3 \frac{mg}{L} - 13.53mg/L}{13.53 mg/L - 20.67mg/L}\right) = 0.22 m^2$$

En la Tabla 24, se muestran los datos de base de diseño correspondientes a las áreas (m²) requeridas para el humedal de flujo subsuperficial para cada parámetro a medir.

Tabla 32 : Área de humedal requerida para cada parámetro a tratar.

Parámetro	Área (m ²)
DBO	0.055
SST	0.003
NT	0.055
PT	0.049
CF	0.127

***Nota: Se utilizó el caudal del biofiltro obtenido en la sección de dimensionamiento de biofiltro, ya que éste es el factor limitante de todo el sistema de tratamiento de agua residual. Se hizo un sobredimensionamiento del 50% de caudal, ya que la capacidad de los humedales para tratar agua es mayor en comparación al biofiltro.

Tabla 33: Resultados de caudal obtenido en biofiltro (L/día) y con un 50% de sobredimensionamiento.

Caudal de biofiltro (Q) (L/día)	
Q (L/ día)	3.35
Q(50% sobredimensionado)(L/ día)	5.03

En la Tabla No. 25. se muestran los datos de base de diseño que corresponden a las concentraciones teóricas de cada contaminante esperadas en la salida del biofiltro que es el influente del humedal y a la salida del humedal (efluente).

Despejando la Ecuación No9. para determinar el caudal para el parámetro de DBO, se obtiene:

$$Q = \frac{A * k_{20}}{\ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*}\right)}$$

$$Q = \frac{2m^2 * \left(\frac{180m}{año}\right) * \left(\frac{año}{365 días}\right)}{\ln\left(\frac{135.3 \frac{mg}{L} - 10.67mg/L}{13.53 mg/L - 10.67mg/L}\right)} = 0.2613 * día = 261.3 \frac{L}{día}$$

Se realizó el mismo cálculo para los demás parámetros a medir, obteniendo los siguientes resultados. Debido a que el biofiltro es el factor limitante de la planta de tratamiento, estos valores únicamente se calcularon para fines de dimensionamiento teórico de humedal.

Tabla 34: Caudal de agua residual a tratar en humedal utilizando el Método de Kadlec.

Parámetro	Caudal (m ³ /día)	Caudal (L/día)
DBO	0.26	261.28
SST	5.29	5287.78
NT	0.26	262.82
PT	0.29	294.04
CF	0.11	113.04

Se determinaron ciertas características experimentales del humedal como el tiempo de retención hidráulica para el humedal (TRH), la carga hidráulica (CH) y la carga orgánica superficial (COS).

- Cálculo de volumen total de tanque cúbico empleado experimentalmente en humedales de flujo subsuperficial

$$V = \text{base} * \text{altura} * \text{profundidad.}$$

$$V = (1m) (0.90m) (1m) = 0.90m^3$$

- Cálculo de volumen real de tanque cúbico para humedal

$$V_{\text{real}} = \text{base} * \text{altura (piedrín)} * \text{profundidad} * \% \text{ de porosidad de piedrín}$$

$$V_{\text{real}} = (1m) * (0.60 m) * (1.m) * (0.50) = 0.30 m^3$$

- Tiempo de retención hidráulica en humedal (TRH)

$$TRH = \frac{E_{\text{espacios vacios}}}{Q}$$

(Ecuación No. 10)

$$TRH = \frac{0.28 \text{ m}^3}{0.01915 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}} = 14.62 \text{ días}$$

- Cálculo de carga hidráulica humedal.

$$CH = Q/As$$

Donde:

Q = Caudal

As = Área superficial (Ecuación No. 11)

$$CH = \frac{0.01915 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}}{0.011 \text{ m}^2} = 1.7409 \text{ m/dia}$$

- Cálculo de cargas orgánicas superficiales

$$COS = (CH)(DBO_{inf})$$

$$COS = (1.7409 \text{ m/dia}) \left(451 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ kg}}{1,000,000 \text{ mg}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 0.7851 \text{ kg DBO/m}^2 * \text{ día}$$

Donde:

CH = carga hidráulica del humedal.

DBO_{inf} = DBO en el influente.

COS = carga orgánica superficial.

(Ecuación No. 12)

- Cálculo de DBO_5 para la muestra inicial.

$$DBO_5 = \frac{DBO_{inicial} - DBO_{final}}{\text{dilución}} = \frac{11.40 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 2.38 \text{ mg/L}}{6 \text{ ml}/300 \text{ ml}} = 451 \text{ mg/L}$$

Nota: Se realizó el mismo cálculo para el DBO_5 para el día de operación 14 y día 21.

DATOS CALCULADOS

Tabla 35: Número de velocidad de cabeza (k) y diámetro de tubería equivalente para válvulas y accesorios.

Cantidad	Accesorio/Válvula	No. de Velocidad de cabezas (K)	Diámetro de tubería equivalente (in)
6	Codo 45°	2.1	45
5	Codo 90°	7.5	187.5
9	Uniones universales	0.36	9
2	Válvula globo 1/4 abiertas	224	5600
1	Accesorio Tee	1.2	30
Total		235.16	5871.5

Tabla 36: Resultados para dimensionamiento de bomba centrífuga

Área seccional tubería	4.91E-04	m ²
Numero de Reynolds	8.62E+04	
Rugosidad relativa	0.00006	
Velocidad de cabeza	0.4824	m
Perdida de cabeza	113.4432	m
Por presión	1,109,538.70	N/m ²
ΔPf	294,417.48	N/m ²
Presión Total	1,403,956.18	N/m ²

Tabla 37: Resultados de trabajo efectuado por la bomba y la potencia necesaria del motor.

Trabajo bomba W	-1558.81	J/kg
Potencia	0.4921	W (J/s)
	0.0005	kW (kJ/s)
	0.0007	hP

Tabla 38: Capacidad máxima de agua residual a tratar en biofiltro según los parámetros de DBO y SST para un sistema con aire y sin aire.

Parámetro	Cap. Max AR tratar (DBO) (L/m ² *día)	Cap. Max AR tratar (SST)(L/m ² *día)
con aire	946.04	377.92
sin aire	295.63	264.55

Tabla 39: Caudal máximo permitido en biofiltro según los parámetros de DBO y SST en un sistema con aire y sin aire.

Parámetro	caudal (DBO)(L/día)	caudal (SST) (L/día)
con aire	11.98	4.79
sin aire	3.75	3.35

Tabla 40: Ecuaciones de regresión y constantes de primer orden para el dimensionamiento de humedales de flujo subsuperficial. (Rousseaus, 2003)

k(m/año)	C* (mg/L)
180	10.6709
3000	11.13396
27	1.5
12	0.02
95	18

Tabla 41: Concentraciones de cada parámetro en la entrada al humedal y salida del humedal y porcentaje (%) de remoción de contaminantes esperado.

Parámetro	AR humedal(mg/L)	Remoción Humedal (%)	Efluente(mg/L)
DBO	135.3	90%	13.53
DQO	186	70%	55.8
SST	52.92	90%	13
NT	21.2	40%	12.72
PT	10.5	20%	8.4
CF	$1.2 \cdot 10^8$	99%	$1.2 \cdot 10^8$

Tabla 42: Área de humedal requerida para cada uno de los parámetros a tratar.

Parámetro	Área (m2)
DBO	0.055
SST	0.003
NT	0.055
PT	0.049
CF	0.127

Tabla 43: Resultados de caudal obtenido en biofiltro (L/día) y con un 50% de sobredimensionamiento.

Caudal biofiltro (L/día)	
Q (L/ día)	3.35
Q(50% sobredimensionado)	5.03

Tabla 44: Resultados de caudal de agua residual a tratar en humedal de flujo subterráneo utilizando el Método de Kadlec.

Parámetro	Caudal (m ³ /día)	Caudal (L/día)
DBO	0.26	261.28
SST	5.29	5287.78
NT	0.26	262.82

Tabla 45: Resultados de volumen de humedal, tiempo de retención hidráulica (TRH), Carga hidráulica (CH) y Cargas orgánicas superficiales (COS) para diseño de sistema.

Descripción	Valor	Unidad
Volumen total de humedal	0.9	m ³
Volumen real de humedal	0.36	m ³
Tiempo de retención Hidráulica	14.62	días
Carga Hidráulica de Humedal	1.7409	m/día
Cargas orgánicas superficiales	0.7851	kg DBO/m ² * día

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES.

Incertidumbres de sumas y restas:

$$dz = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (\text{Ecuación No.13})$$

- Análisis de error para diferencia entre el DBO₅ inicial y DBO₅ final según el método empleado a los 7 días de operación.

$$dz = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2} = \pm 0.01414$$

b. Incertidumbres de multiplicaciones y divisiones:

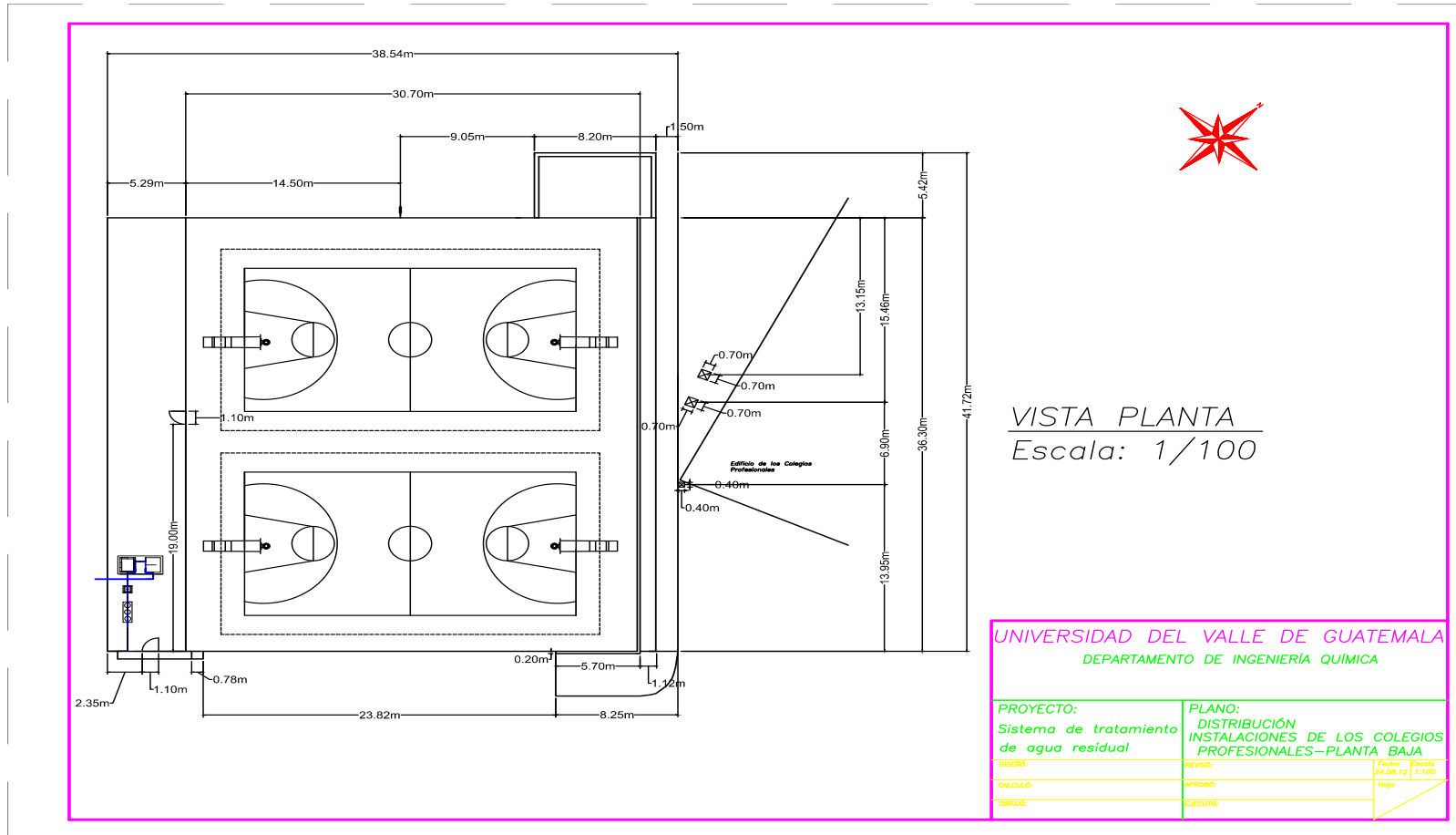
$$dz = z \sqrt{\left(\frac{dx}{x}\right)^2 + \left(\frac{dy}{y}\right)^2} \quad (\text{Ecuación No.14})$$

- Cálculo de análisis de error para razón entre DBO₅ inicial y DBO₅ final y la dilución empleada durante el método de análisis para muestra inicial a los 7 días de operación

$$dz = 0.0854 \sqrt{\frac{0.01414^2}{8.6} + \frac{0.05^2}{6} + \frac{0.05^2}{300}} = 451 \pm 3.83$$

PLANOS

Imagen 7: Planos de distribución de área recreativa del Edificio de los Colegios Profesionales



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA

PROYECTO: Sistema de tratamiento de agua residual	PLANO: DISTRIBUCIÓN DE LAS INSTALACIONES DE LOS COLEGIOS PROFESIONALES-PLANTA BAJA
DISEÑO:	REVISÓ:
CALCULO:	APROBÓ:
DIBUJÓ:	EJECUTÓ:
	Fecha: 24.08.12 Escala: 1:100

Imagen 7: Planos de distribución sistema de tratamiento de agua residual

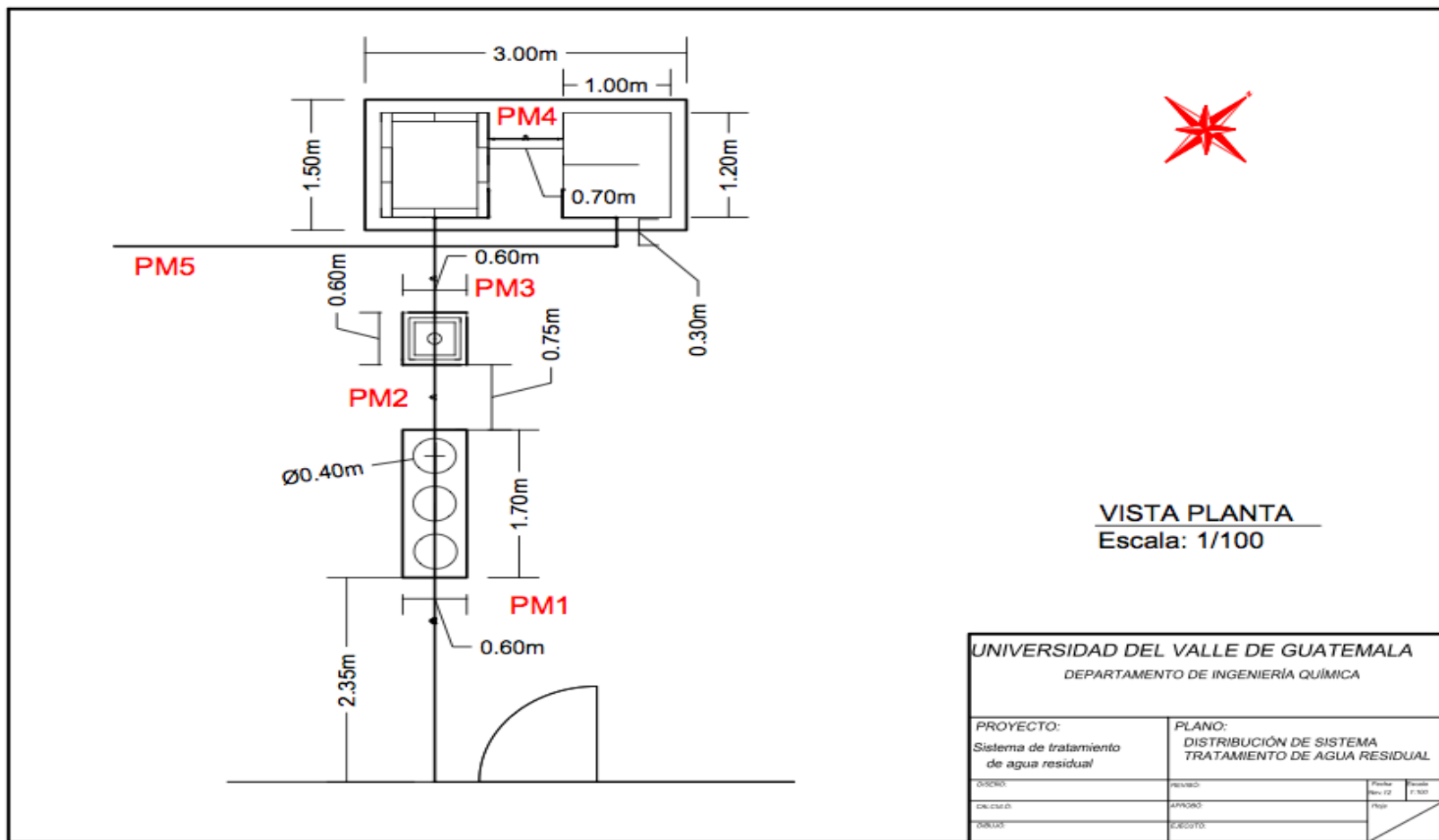


Imagen 8: Planos instalaciones hidrosanitarias de sistema de tratamiento de agua residual

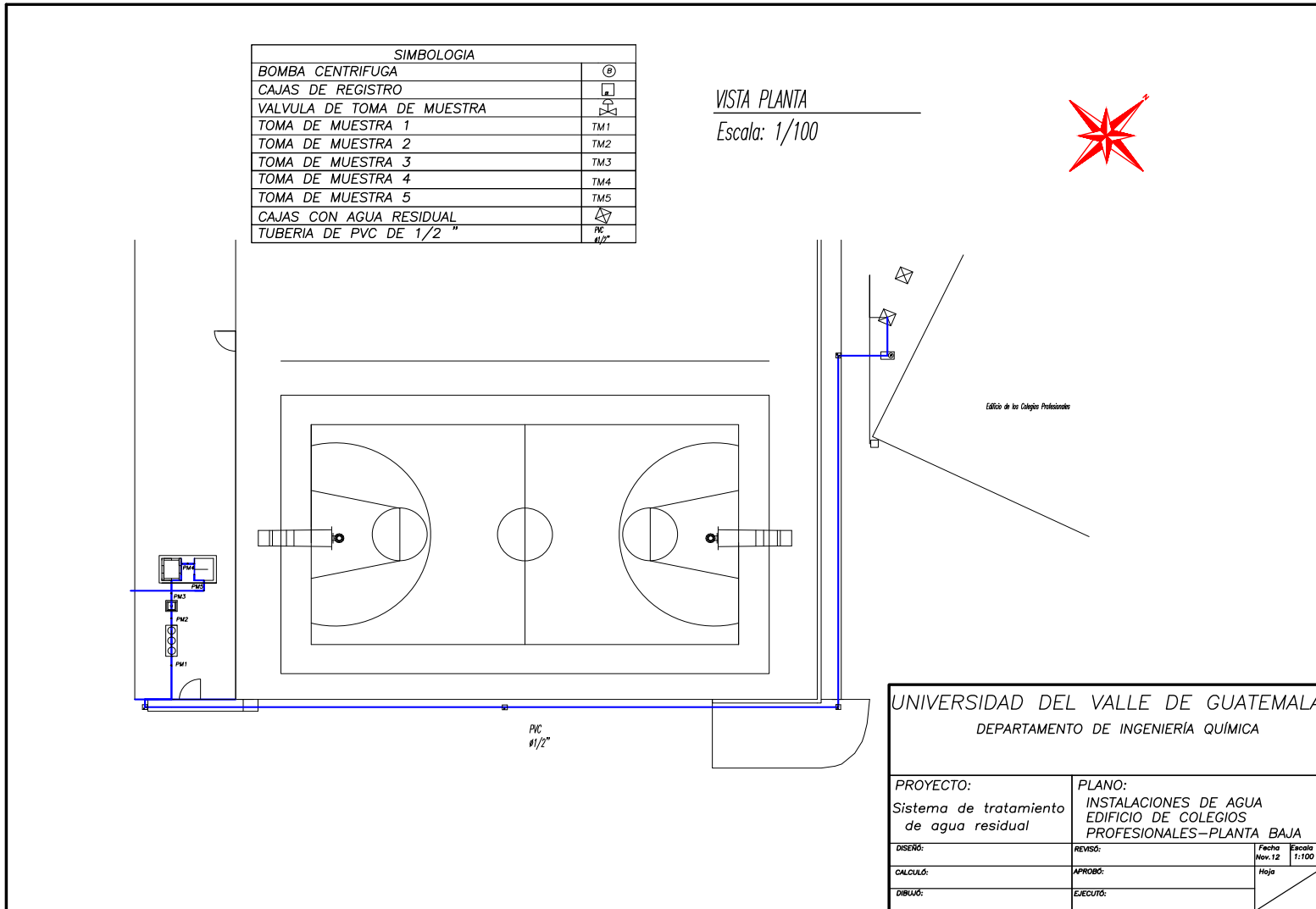
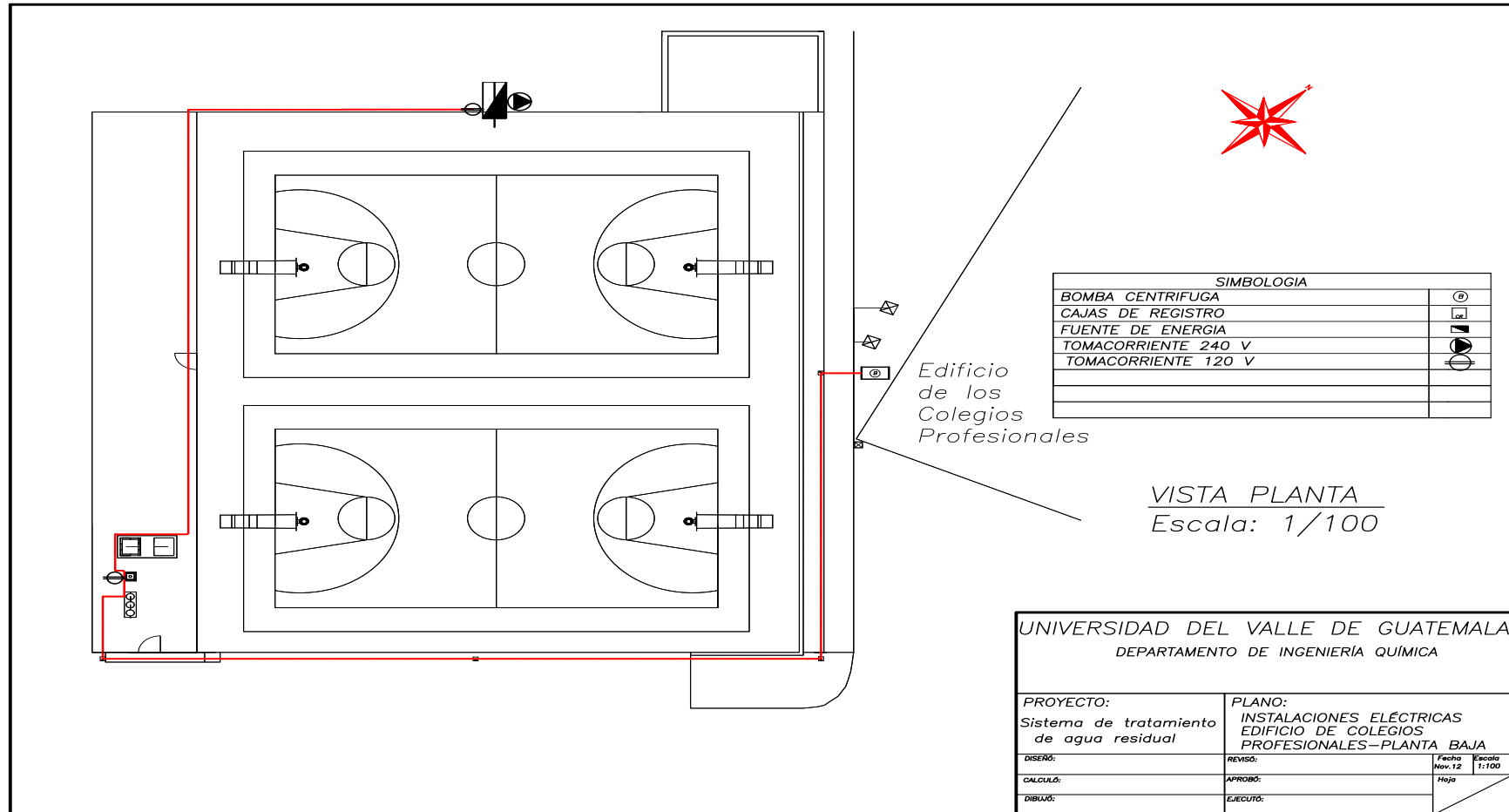


Imagen 9: Planos instalaciones eléctricas de sistema de tratamiento de agua residual.



DATOS DE PLACA

Tabla 46: Datos de placa de equipo.

Equipo	Especificaciones
Bomba centrífuga	<p> Marca: Sta-Rite, Project Delavan, WI 53115 Motor No. C4BH2EC11C3 RPM : 3480 RPM Potencia: 0.5 HP Voltaje: 115/230 V 60 Hz Temperatura Ambiente: 50C Número de Modelo: SNC-L Código: 001C128. </p> <div style="text-align: center;">  </div>
Bomba dosificadora	<p> Marca: PULSATRON ElectronicMeteringPump. Fecha de elaboración: 06/12 Serial: 379411 KOPKIT: K2VTC1. Número de Item. LD02SA-VTC1-XXX Voltaje: 115V Amperaje: 0.40 A Hertz: 50/60 Hz Número de Fases: 1 Presión máxima: 80 Psi. 5.6 bar. </p> <div style="text-align: center;">  </div>

COSTOS DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA

Tabla 47: Costos de material y equipo para conexiones a procesos.

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Tubo Ducto de PVC 1/2" (6 m)	11	Corpovalgua	Q 35.30	Q 388.30
Tubería de PVCE -anaranjada- 1/2" (3 m)	3	Corpovalgua	Q 17.70	Q 53.10
uniones universales 1/2" de PVC	15	Corpovalgua	Q 13.00	Q 195.00
uniones universales 1/2" de PVCE - anaranjada-	10	Corpovalgua	Q 2.30	Q 23.00
Codos 1/2" de 90° de PVC	10	Corpovalgua	Q 1.90	Q 19.00
T 1/2" de PVC	10	Corpovalgua	Q 2.20	Q 22.00
Llave de bola de 1/2" de diámetro de bronce	5	Corpovalgua	Q 76.00	Q 380.00
Adaptadores Macho 1/2" PVC	2	Corpovalgua	Q 3.40	Q 6.80
Conectores machos 1/4" para manguera	6	Corpovalgua	Q 18.60	Q 111.60
Abrazaderas de metal 1"	15	Corpovalgua	Q 2.40	Q 36.00
Rollos Teflón 3/4"	10	Corpovalgua	Q 3.90	Q 39.00
Pie Manguera de plástico para bombear AR 1/4" de 20'	20	Corpovalgua	Q 14.60	Q 292.00
Pegamento para PVC 1/28"	1	Corpovalgua	Q 136.00	Q 136.00
abrazadera de 1/2" de metal	15	Corpovalgua	Q 0.40	Q 6.00
Conectores de PVC de 1/2"	15	Corpovalgua	Q 2.40	Q 36.00
Pie de manguera Nylon de 1/4" de 20'	1	Corpovalgua	Q 180.00	Q 180.00
Codos 1/2" de 45° de PVC	10	Ferretería	Q 1.90	Q 19.00
Válvulas de globo PVC 1/2"	3	Ferretería	Q 10.00	Q 30.00
Cajas de registro	4		Q 35.00	Q 140.00
TOTAL				Q 2,112.80

Tabla 48: Costos de material y equipo para fosas sépticas

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Cubeta de 40 L para fosa séptica	3	Corpovalgua	Q 60.00	Q 180.00
Medidores de nivel Cubetas	1	Corpovalgua	Q 395.00	Q 395.00
Adaptador Macho PVC de 1/2"	4	Ferretería	Q 10.00	Q 40.00
Adaptador Hembra PVC de 1/2"	4	Ferretería	Q 10.00	Q 40.00
Caja de empaques de hule	1	Ferretería	Q 20.00	Q 20.00
TOTAL				Q 675.00

Tabla 49: Costos de material y equipo para biofiltro de lecho orgánico

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Angular hembra HN 1/8"x1"x6 m	5	Corpovalgua	Q 116.00	Q 580.00
Tubo cuadrado HN chapa 18 de 2"x2"x6 m	4	Corpovalgua	Q 210.00	Q 840.00
Empaque de Hule	1	Corpovalgua	Q 498.00	Q 498.00
Libra Electrodo, punta café	5	Corpovalgua	Q 19.60	Q 98.00
Bomba Peristáltica (Dosificadora)	1	Dilab	Q 5,373.90	Q 5,373.90
Tubo de Acrílico de 5" de diámetro, 1.84 de largo	1	Oreon	Q 1,849.77	Q 1,849.77
Tapaderas de PVC para parte superior e inferior del reactor de 5" de diámetro	2	Oreon	Q 80.00	Q 160.00
Bomba de aire para biofiltro	1	Arca de Noé	Q 150.00	Q 150.00
Material Filtrante (ficus en pequeños trozos)		UVG	-	-
TOTAL				Q 9,549.67

Tabla 50: Costos de material y equipo para humedales de flujo subsuperficial

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Reductores Bushing Hierro Galvanizado 2"x1/2"	2	Corpovalgua	Q 36.00	Q 72.00
Tanque de Polipropileno 1m3	2	UVG	-	-
Metros cúbicos de piedrín (1-5 cm de diámetro)	2	UVG	Q 115.00	Q 230.00
Piedra grande		UVG	-	-
Plantas Cola de caballo	6	Vivero	Q 20.00	Q 120.00
Plantas Cartucho Blanco	6	Vivero	Q 25.00	Q 150.00
TOTAL				Q 572.00

Tabla 51: Costos de material y equipo para conexiones eléctricas

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Cable eléctrico #6 de 100 m (verde, rojo y blanco)	3	Corpovalgua	Q 1,831.50	Q 5,494.50
Conectores de cable eléctricos para empalmes	3	Corpovalgua	Q 16.43	Q 49.30
Flipón de 2x20	2	Corpovalgua	Q 136.00	Q 272.00
Flipón de 20	1	Corpovalgua	Q 54.00	Q 54.00
Cajas de registro eléctrico	3	Corpovalgua	Q 6.00	Q 18.00
Poliducto de 1". 100 m	1	Corpovalgua	Q 720.00	Q 720.00
Caja para 4 flipones 220V	1	Corpovalgua	Q 268.20	Q 268.20
TOTAL				Q 6,876.00

Tabla 52: Costos de material y equipo para instalaciones de bomba centrífuga.

Equipo o material	Cantidad	Proveedor	Costo unitario	Costo total
Bomba centrífuga Sta-Rite	1	Hidrotecnia	Q 2,197.52	Q 2,197.52
pichacha vertical de hierro galvanizado 1"	1	Corpovalgua	Q 65.00	Q 65.00
Rollos de teflón de 1/2"	10	Corpovalgua	Q 3.10	Q 31.00
Unión Universal de HG de 1"	1	Ferretería	Q 17.00	Q 17.00
Niple de HG de 1" y 1 1/4"	10	Ferretería	Q 10.00	Q 100.00
T de HG de 1"	1	Ferretería	Q 15.00	Q 15.00
Reductor HG de 1 1/4 a 1"	1	Ferretería	Q 25.00	Q 25.00
Reductor HG de 1 a 1/2"	2	Ferretería	Q 25.00	Q 50.00
Codo de 90 de HG 1"	4	Ferretería	Q 15.00	Q 60.00
Cheque de 1" de HG	1	Ferretería	Q 20.00	Q 20.00
Tubo de HG de 19"	1	Ferretería	Q 30.00	Q 30.00
Acople de PVC de 1/2"	2	Ferretería	Q 3.00	Q 6.00
Codos de PVC de 90 de 1/2"	2	Ferretería	Q 2.00	Q 4.00
Válvula de Globo de 1/2"	1	Ferretería	Q 10.00	Q 10.00
TOTAL				Q 2,630.52

Tabla 53: Costo de Mano de obra con prestaciones de ley incluidas

Cantidad personas	Actividad	Total horas	Costo por hora	Costo Total
2	Preparación de terreno	16	Q 8.50	Q 272.00
3	Estructura metálica	8	Q 8.50	Q 204.00
2	Trámites administrativos	20	Q 8.50	Q 340.00
3	Fundiciones	8	Q 8.50	Q 204.00
2	Construcción caja bomba centrifuga	4	Q 8.50	Q 68.00
2	Instalación de bomba centrifuga	12	Q 8.50	Q 204.00
2	Zanjas conexiones	8	Q 8.50	Q 136.00
2	Instalación biofiltro	12	Q 8.50	Q 204.00
2	Instalación de humedales	15	Q 8.50	Q 255.00
2	Instalación de fosa séptica	4	Q 8.50	Q 68.00
2	Instalación de conexiones a proceso	12	Q 8.50	Q 204.00
3	Instalación de conexiones eléctricas	15	Q 25.50	Q 1,147.50
2	Supervisión	12	Q 34.00	Q 816.00
			Total sin prestaciones	Q 4,122.50
			Total	Q 6,018.85

Por lo tanto, el costo total de la instalación del equipo y sistemas auxiliares fue de Q.30, 507.59

MÉTODOS DE ANALISIS DE AGUA RESIDUAL

El monitoreo del sistema de tratamiento consistió en realizar análisis de influente y efluente semanalmente. Para esto, se utilizaron los siguientes métodos de análisis.

Tabla 54: Métodos de análisis de agua residual.

Parámetro	Método de análisis	Equipo empleado
pH	Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater/ USA EPA	Potenciómetro HACH
Conductividad eléctrica	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater/ USA EPA	Potenciómetro HACH
Nitratos y fosfatos	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater/ USA EPA	Potenciómetro HACH
Sólidos suspendidos Totales	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater/ USA EPA	Potenciómetro HACH
DBO ₅	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater/ USA EPA	Potenciómetro HACH

Resultados de los parámetros de control.

Los análisis descritos, se realizaron en diferentes puntos de muestreo siendo:

PM1 = Entrada a la fosa Séptica.

PM2= Salida de la fosa séptica y entrada a Biofiltro

PM3= Salida de Biofiltro y entrada a Humedal No.1

PM4= Salida de humedal No.1 y entrada a Humedal No.2

PM5 = Salida de Humedal No.1

(Ver diagrama de flujo de la Sección de Resultados).

1) Conductividad

Es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Es una medida indirecta de la cantidad de iones en una solución (cloruros, nitratos, sulfatos,

fosfatos, sodio, magnesio y calcio). Las descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de las concentraciones de iones Cl, NO₃ y SO₄.

La unidad básica para medir la conductividad es el siemens por centímetro. El agua destilada tiene una conductividad en el rango de 0,5 a 3 µSiemens/cm (un µS es la millonésima parte de un Siemens). La conductividad de nuestros sistemas continentales generalmente es baja, variando entre 50 y 1.500 µS/cm. En sistemas de agua dulce, conductividades por fuera de este rango pueden indicar que el agua no es adecuada para la vida de ciertas especies de peces o invertebrados. Algunos efluentes industriales pueden llegar a tener más de 10.000 µS/cm. (EPA, 1997).

Método.

1. Conecte la sonda al medidor identificado con "Cond", asegurándose que quede bien ajustada.
2. Encienda el medidor y ajuste con el código establecido para obtener la medición de conductividad
3. Limpiar el electrodo con agua destilada o des ionizada.
4. Calibración del instrumento.
 - a. Utilizar o preparar una solución de NaCl 0.5 N para la calibración del equipo.
 - b. Introducir el electrodo en la solución de NaCl 0.5 N previamente preparada y presionar "Cal" para iniciar la calibración del equipo.
5. Calibrado el instrumento con la solución de NaCl, introducir limpiar el electrodo con agua destilada e introducir en la muestra de agua residual.
6. Presionar READ para iniciar la lectura. La pantalla desplegará el resultado en µSiemens/cm.
7. Una vez finalizada la medida enjuagar y secar suavemente los electrodos y proceder a ubicarlos en la solución de preserva de los mismos.

2) Nitrato

Ciclo del nitrógeno

Los seres vivos cuentan con una gran proporción de nitrógeno en su composición química. El nitrógeno oxidado que reciben como nitrato (NO₃) es transformado a

grupos aminoácidos (proceso de asimilación). Para volver a contar con nitrato hace falta que descomponedores lo extraigan de la biomasa dejándolo en la forma reducida de ion amonio (NH_4^+) (proceso de amonificación); y luego el amonio es oxidado a nitrato (proceso de nitrificación).

- Proceso de nitrificación

Es la oxidación biológica del amonio al nitrato por microorganismos aerobios que usan el oxígeno moléculas O_2 como receptor de electrones (oxidante).

El proceso fue descubierto por Serguei Vinogradski y se tienen dos procesos distintos, separados y consecutivos, realizados por microorganismos diferentes:

- Nitratación: partiendo de amonio se obtiene nitrito (NO_2^-)
- Nitratación: partiendo de nitrito se produce nitrato (NO_3^-)

- Proceso de amonificación:

Es la conversión a ion amonio del nitrógeno que en la materia viva aparece principalmente como grupos amino (NH_2) o imino (NH). Los animales acuáticos producen directamente amoniaco (NH_3), que en disolución se convierte en ion amonio. Los terrestres producen Urea que es muy soluble y se concentra en la orina.

El nitrógeno biológico que no llega ya como amonio al sustrato, la mayor parte en ecosistemas continentales, es convertido a esa forma por la acción de microorganismos descomponedores.

La combinación de la amonificación y nitrificación devuelve a una forma asimilable por las plantas, el nitrógeno que ellas tomaron del suelo y pusieron en circulación por la cadena trófica.

Existen otros dos procesos mutuamente simétricos, en los que está implicado el nitrógeno atmosférico (N_2) y que sin estos procesos, los océanos serían ricos en nitrógeno, pero los continentes estarían prácticamente desprovistos de nitrógeno y convertidos en desiertos biológicos. Estos procesos son:

- Fijación y asimilación de nitrógeno

El primer paso en el ciclo es la fijación del nitrógeno de la atmósfera (N_2) a formas distintas susceptibles de incorporarse a la composición del suelo o de los seres

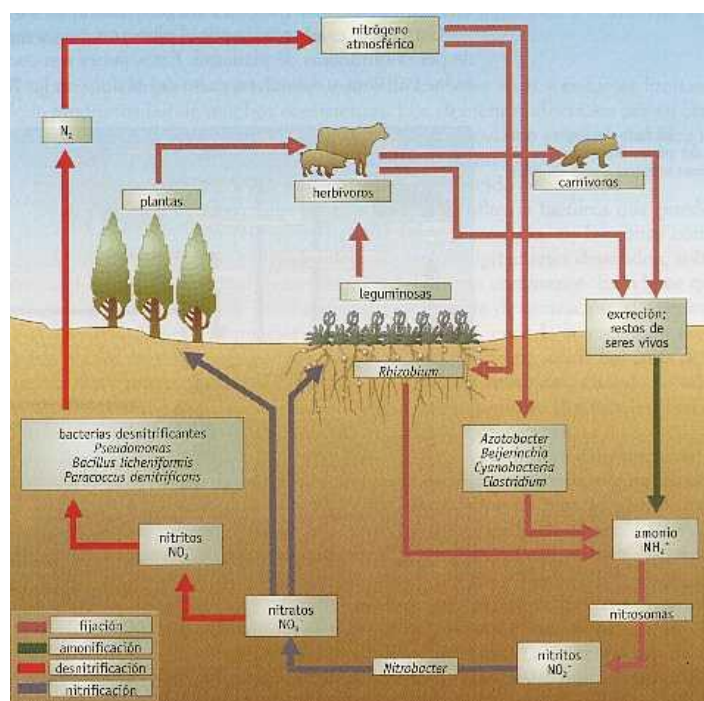
vivos, como el ion amonio (NH_4^+) y los iones nitrito (NO_2^-) o nitrato (NO_3^-), y también su conversión a sustancias atmosféricas químicamente activas como el dióxido de nitrógeno (NO_2) que reaccionan fácilmente para originar algunas de las anteriores.

- Desnitrificación

Es la reducción del ion nitrato (NO_3^-), presente en el suelo o el agua, a nitrógeno molecular o diatómico (N_2), la sustancia más abundante en la composición del aire. Por su lugar en el ciclo del nitrógeno este proceso es el puesto a la fijación del nitrógeno. El proceso es parte de un metabolismo degradativo de la respiración anaerobia, en la que el nitrato toma el papel de oxidante (aceptor de electrones) que en la respiración celular normal o aerobia corresponde al oxígeno (O_2).

La des nitrificación es empleada, en los procesos técnicos de depuración controlada de aguas residuales, para eliminar el nitrato, cuya presencia favorece la eutrofización y reduce la potabilidad del agua, porque se reduce a nitrito por la flor intestinal y éste es cancerígeno.

Imagen 10. Ciclo de nitrógeno



(Obtenida de Capene, *et al.* 2006.)

Método de Nitra Ver 5.

Método 8190.

1. Encender el equipo e ingresar el número de programa almacenado por el usuario para el nitrato Test 'N Tube.
2. Realizar diluciones de la muestra, en caso que los valores de las muestras iniciales salgan del límite máximo que da el equipo.
3. Agregar 20 ml de muestra a uno de las celdas de muestra y agregar los contenidos de una bolsa de polvo NitraVer 5.
4. Tapar y agitar la celda para disolver el polvo
5. A la otra celda, agregar 20 ml de agua destilada o desionizada, el cual se utilizará como blanco durante el análisis.
6. Tapar herméticamente ambos tubos y agitar para disolver.
7. Limpiar el exterior del tubo con una toalla y colocar el tubo con el blanco en el adaptador. Colocar la tapa en el adaptador
8. Presionar ZERO para colocar la puesta a cero del equipo, donde se leerá 0.0 ml/L en la pantalla.
9. Presionar SHIFT TIMER para comenzar un periodo de espera de 2 minutos.
10. Cuando suene el cronómetro, limpiar el exterior del tubo de muestreo con una toalla.
11. Colocar el tubo de muestreo preparado en el adaptador. Tapar el adaptador.
12. Presionar READ. Luego en la pantalla aparecerán los resultados en mg/l de NO_3 .

3) pH

Es uno de los parámetros más importantes en el control de la calidad de agua y en la limpieza biológica de las aguas residuales tiene una influencia esencial en la actividad de los microorganismos. La acidez o alcalinidad de un medio juega un papel muy importante en las reacciones biológicas y mecanico-físicas. Existen varias reacciones como la precipitación, detoxificación, asimilación de nutrientes, facilitación de reacciones y la velocidad de reacción del proceso, que únicamente se llevan a cabo con pH controlados. (EPA, 1997)

En el área de tratamiento de aguas residuales (industriales o habitacionales) un nivel de pH extremo puede resultar en cualquiera de los siguientes efectos dañinos:

- Los microorganismos de los procesos de purificación biológica son sensibles a condiciones demasiado ácidas o alcalinas. El pH de los lodos deberá estar

en el rango neutral de pH 7. A un pH menor a 5 o mayor a 10 la actividad bacteriana prácticamente cesa.

- La solubilidad de muchas sustancias varía con la temperatura y el pH, lo que puede generar una precipitación no deseada de sólidos. (EPA, 1997)

Método.

1. Conecte la sonda al medidor identificado con "pH", asegurándose que quede bien ajustada.
2. Encienda el medidor y ajuste con el código establecido para obtener la medición de pH.
3. Limpiar el electrodo con agua destilada o des ionizada.
4. Calibración del instrumento.
 - a. Seguir las instrucciones del medidor de pH utilizando como mínimo dos de las soluciones buffer, cuyos valores deben cubrir el rango de pH esperado por la muestra a medir.
 - b. Llevar los buffer y la muestra a la misma temperatura. De lo contrario, el valor correspondiente de pH de los buffers debe de ser corregido a la misma temperatura.
 - c. Introducir el electrodo a la solución buffer de pH = 4.00 a 25°C y esperar a que el equipo estabilice. Automáticamente indicará que se puede introducir el electrodo a la segunda solución buffer (pH = 7.00).
5. Calibrado el instrumento con las dos soluciones buffer, introducir el electrodo en la muestra a analizar y presionar READ para obtener la lectura.
6. Una vez finalizada la medida enjuagar y secar suavemente los electrodos y proceder a ubicarlos en la solución de preserva de los mismos.

4) Sólidos Suspendidos totales.

La cantidad de solidos totales en el agua residual, depende de los sólidos disueltos, como el calcio, cloruros, nitratos, fosforo, hierro, azufre y partículas que pasan a través de un filtro con poros de alrededor de 2 micras (0.002 cm) y de los sólidos en suspensión, que son partículas de arcilla, plancton, algas, restos orgánicos finos y otras partículas que no pasan a través de filtros de 2 micrones.

Mayores concentraciones de solidos suspendidos pueden servir como portadores de tóxicos, que fácilmente se adhieren a las partículas en suspensión. Una alta concentración de solidos totales hace que el agua potable presente un sabor

desagradable y puede reducir la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales y el funcionamiento de los procesos industriales que emplean agua bruta.

Así mismo, afectan la claridad del agua, disminuyendo el paso de la luz a través de la misma, y disminuyendo la fotosíntesis de las plantas acuáticas. Esto hace que el agua se caliente más rápidamente, reteniendo el calor y afectando negativamente la vida acuática. (EPA, 1997).

Método.

1. Conecte la sonda al medidor identificado, asegurándose que quede bien ajustada.
2. Encienda el medidor y ajuste con el código establecido para obtener la medición de sólidos suspendidos totales.
3. Limpiar el electrodo con agua destilada o des ionizada.
4. Preparación de la muestra.
 - a. Medir 300 ml de muestra con la ayuda de un Baker de 500 ml.
 - b. Introducir la muestra en una licuadora y licuar la muestra durante 2 minutos.
 - c. Una vez licuada la muestra, trasvasar nuevamente al beaker de 500 ml y luego 20 ml de la muestra a la celda.
5. A la otra celda, agregar 20 ml de agua destilada o des ionizada, el cual se utilizará como blanco durante el análisis.
6. Tapar herméticamente ambas celdas.
7. Limpiar el exterior del tubo con una toalla y colocar el tubo con el blanco en el adaptador. Colocar la tapa en el adaptador
8. Presionar ZERO para colocar la puesta a cero del equipo, donde se leerá 0.0 ml/L en la pantalla.
9. Colocar la celda con la muestra dentro del equipo y tapar.
10. Presionar READ. Luego en la pantalla aparecerán los resultados en mg/L de SST.

5) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una medición empírica de los requerimientos de oxígeno para aguas cloacales y residuales municipales e industriales. Los resultados de la prueba se utilizan para calcular el efecto de los desechos residuales en los recursos de oxígeno de las aguas de recepción. La

prueba de DBO tiene un valor limitado en la medición de la demanda actual de oxígeno ya que el cambio de la temperatura, la población biológica, el movimiento del agua, la luz solar, la concentración de oxígeno y otros factores ambientales no se pueden representar con exactitud en el laboratorio. La prueba DBO tiene un valor importante después de que los modelos de absorción de oxígeno para desechos específicos y el agua de recepción se hayan establecido. (EPA, 1997).

Método de dilución (Método 8043)

1. Prepara el agua para diluir la muestra utilizando una bolsa de solución tampón de nutriente de DBO.
 - a. Seleccionar la bolsa de solución tapón de nutriente de DBO para 3 litros de agua (No de catálogo 14861-98).
 - b. Llenar un beaker de 5L con agua destilada a 20 C hasta 3 L.
 - c. Sacudir la bolsa, abrirla y agregar el contenido en el beaker de 5 litros.
 - d. Agitar la solución hasta que se toda la solución tapón se encuentre disuelta en el agua destilada.
2. Determinar el rango de volúmenes de las muestras requeridos por la muestra.
3. Medir con una pipeta una serie graduada de por lo menos cuatro pero preferentemente cinco o seis porciones de muestra bien mezcladas y transferirlas a botellas separadas de DBO de 300 ml y con tapón de vidrio. Agitar la muestra con la pipeta antes de colocar con la pipeta cada porción.
4. Llenar cada botella exactamente hasta el pico con agua de dilución. Al agregar el agua, dejar que la misma caiga lentamente por los lados de la botella para evitar la formación de burbujas.
5. Tapar la botella, apretar el tapón de la botella con el dedo e invertir la botella varias veces para que se mezcle.
6. Agregar al pico de la botella agua de dilución suficiente para formar un sello de agua.
7. Realizar las mediciones de DBO iniciales, en el día de la preparación de la muestra.
8. Incubar en la oscuridad durante 5 días a $20 \pm 1^\circ\text{C}$.
9. Cuando se haya completado el periodo de incubación, determinar el contenido de oxígeno disuelto en cada botella.

6) Coliformes fecales.

Como indicadores de la contaminación por aguas negras, se emplean dos grupos de bacterias (coliformes fecales y estreptococos fecales), ya que se encuentran comúnmente en las heces humanas y animales. Éstos indican la posible presencia de patógenos (causantes de enfermedades), bacterias, virus y protozoos que también habitan en el sistema digestivo de humanos y animales. Además del posible riesgo para la salud asociado a la presencia de niveles elevados de bacterias fecales, pueden causar agua turbia, olores desagradables y una mayor demanda de oxígeno.

Los coliformes fecales, son un subconjunto de bacterias coliformes totales. Éste grupo contiene un género, llamado *Klebsiella*, que se asocian comúnmente con la materia textil y de la pulpa y los desechos de fábricas de papel. (EPA, 1997)

Para las aguas recreativas, los coliformes fecales fue el principal indicador de bacterias hasta hace poco tiempo, cuando la EPA recomendó al *E.Coli* (es una especie de bacterias coliformes fecales, específico de la materia fecal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente) y estreptococos como mejores indicadores de riesgos para la salud por el contacto del agua. (EPA, 1997)

7) Fósforo/ Fosfatos

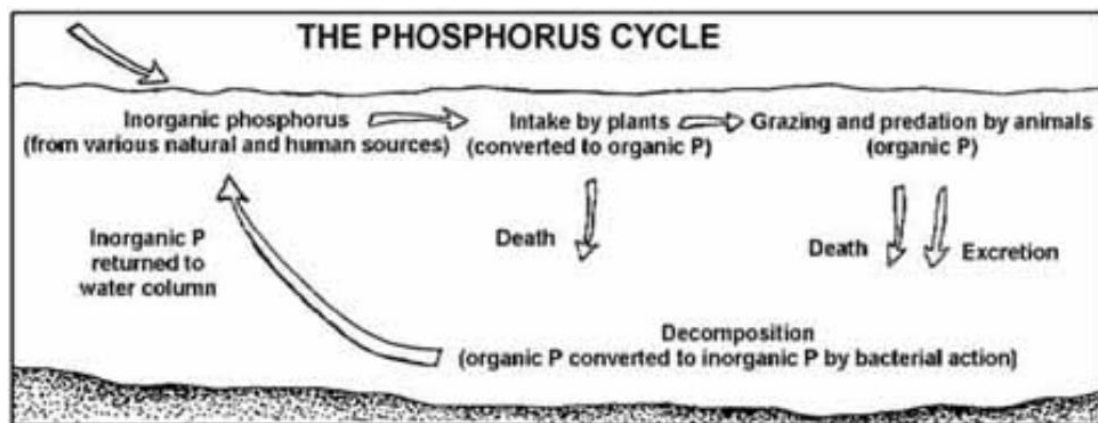
Al igual que el Nitrógeno, el fósforo es un nutriente esencial para las plantas y animales que componen la cadena alimenticia. En la naturaleza, el fosforo generalmente existe como parte de una molécula de fosfato (PO_4). En sistemas acuáticos se produce como fosfato orgánico y fosfato inorgánico. El fosfato orgánico consiste en una molécula de fosfato asociada con una molécula basada en el carbón. El fosfato no asociado con el material orgánico es inorgánico y es la forma requerida por las plantas. (EPA, 1997)

Ciclo del fósforo.

Las plantas acuáticas toman el fosforo inorgánico disuelto y lo convierten en fosforo orgánico como parte de sus tejidos. Los animales obtienen el fosforo orgánico que necesitan, por el consumo de plantas acuáticas, otros animales o plantas en descomposición y material animal.

Con los excrementos de plantas y animales, el fósforo orgánico que contienen sufren una descomposición bacteriana donde se convierte de nuevo a fósforo inorgánico, disuelto y adherido a partículas. Este fósforo inorgánico se pone de nuevo en la columna de agua cuando el fondo se agita por los animales, la actividad humana, las interacciones químicas, o corrientes de agua. Entonces se toma por las plantas y el ciclo comienza de nuevo. (EPA, 1997)

Imagen 10: Ciclo del fósforo.



(Obtenida de: EPA, 1997)

Método de PhosVer 5.

Método 8190.

1. Encender el equipo e ingresar el número de programa almacenado por el usuario para el fosfato reactivo, Test 'N Tube.
2. Realizar diluciones de la muestra, en caso que los valores de las muestras iniciales salgan del límite máximo que da el equipo.
3. Agregar 20 ml de muestra a uno de los dos tubos y agregar los contenidos de una bolsa de polvo PhosVer 5.
4. Al otro tubo, agregar 20 ml de agua destilada o des ionizada, el cual se utilizará como blanco durante el análisis.
5. Tapar herméticamente ambos tubos y agitar para disolver.
6. Limpiar el exterior del tubo con una toalla y colocar el tubo con el blanco en el adaptador. Colocar la tapa en el adaptador
7. Presionar ZERO para colocar la puesta a cero del equipo, donde se leerá 0.0 ml/L en la pantalla.
8. Presionar SHIFT TIMER para comenzar un periodo de espera de 2 minutos.

9. Cuando suene el cronómetro, limpiar el exterior del tubo de muestreo con una toalla.
10. Colocar el tubo de muestreo preparado en el adaptador. Tapar el adaptador.

DESCRIPCIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO

El sistema de tratamiento de agua consta de: Una bomba centrífuga de 0.5 HP marca StaRite, la cual se encarga de bombear el agua desde la caja de agua cruda hasta la primera cubeta de 40L (fosa séptica). La bomba cuenta con un filtro de ½" y una pichacha que no permite el paso de sólidos y un sistema de recirculación "bypass" para reducir el caudal al que se necesita tratar en el sistema. Cuenta con tres cubetas de polipropileno (Plástico) de 40L con su respectiva tapadera. Su función es sedimentar los lodos primarios y separar las grasas y aceites.

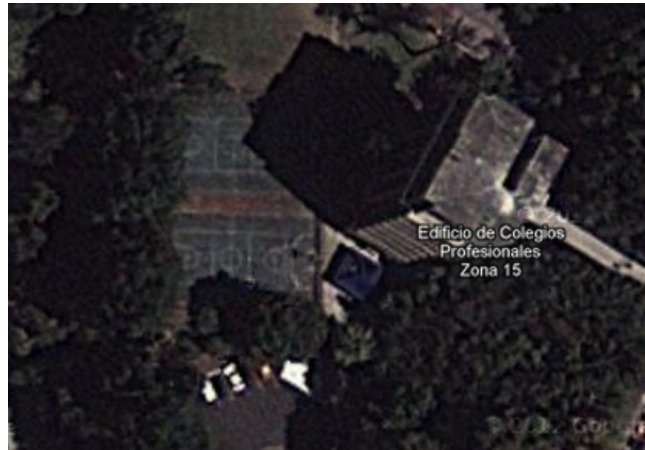
Con la ayuda de una bomba dosificadora (peristáltica), se dosifica el biofiltro de lecho orgánico desde la parte superior atravesándolo por gravedad. Luego, se regula por medio de una válvula de globo hacia el primer humedal, sale del humedal por la parte inferior y por el fenómeno de vasos comunicantes, pasa hacia el segundo humedal por la parte inferior. Al atravesar el segundo humedal, sale por la parte inferior, regulando su salida por medio de una válvula de globo.

- Localización de sistema de tratamiento de agua residual.

El sistema se localiza en la parte trasera de la cancha de Basquetbol, ubicada en el área de recreación en las instalaciones de los Colegio Profesionales de Guatemala ubicada en la 0 calle 15-46 zona 15, Colonia El Maestro, Guatemala.

En la Imagen 12, se encuentra la vista satelital de la ubicación del colegio de profesionales y enmarcado el sitio exacto en donde se localiza la planta de tratamiento.

Imagen 11: Vista satelital del terreno donde se localiza el sistema de tratamiento de agua.



Con la ubicación del terreno, los planos de distribución del área recreativa del edificio de Los Colegios Profesionales y los planos del sistema de tratamiento de agua con las tres vistas (planta, elevación y perfil), se procedió a la construcción del sistema. Con la ayuda del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala y la Asamblea de Presidentes de los Colegios Profesionales, donde se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizaron varias visitas a la planta para ubicar la posición de la bomba centrífuga 0.5 HP, las conexiones de tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ ", colocación de poliductos de 1" con cables eléctricos Calibre 6 (Rojo, blanco y verde) y disponibilidad del terreno para ser trabajado.

Imagen 12: Análisis de área de trabajo.



- Corte y limpieza de tanques de polipropileno con capacidad de 1m³ para humedales. Elaboración de divisiones de humedales para un flujo de agua adecuado.

Imagen 13: Ajustes de tanque cúbico para humedal de flujo subsuperficial.



- Fundición del terreno en donde se colocó la estructura del Biofiltro, los humedales y la fosa séptica, con base en las dimensiones de los planos.

Imagen14: Fundiciones para instalación de equipo



- Instalación de las estructuras metálicas y soldadura a los pines anclados a la fundición, permitiendo que la estructura se mantenga fija y soporte el peso del material filtrante.

- Apertura de zanjas en la tierra, en donde se introdujo la tubería de PVC de ½ pulgadas (cada uno con sus respectivos accesorios) y poliducto de 1" con cables eléctricos calibre #6.
- Colocación de 4 cajas de registro por todo el recorrido de la tubería PVC y poliducto de 1" desde bomba centrífuga hasta fosas sépticas.

Imagen 15: Arreglo de tubería de PVC de ½ "en cajas de registro



- Instalación de tubería de PVC de ½ "desde la salida de la bomba centrífuga StaRite 0.5 HP hasta la salida de agua en el segundo humedal.

Imagen16: Instalación de tubería de PVC ½ "



Imagen 17: Conexiones a proceso para Humedales.



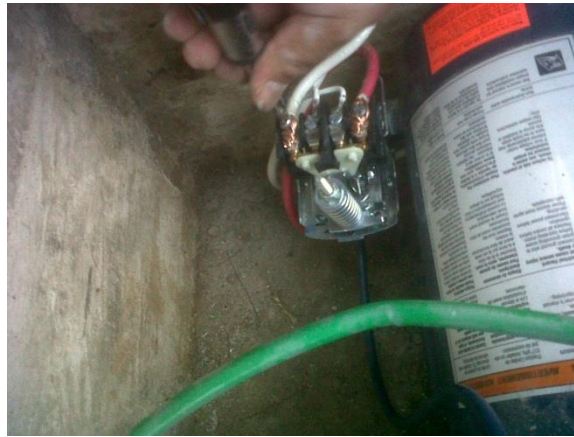
- Conexiones para agua de la bomba centrífuga StaRite 0.5 HP con tubería de hierro galvanizado (HG) de 1 ¼ "para la succión y 1" para la descarga.
- Instalación de la bomba en su caja de concreto.

Imagen 18: Arreglo e Instalación de bomba centrífuga 0.5 hp starite.



- Instalaciones eléctricas desde la caja de fuente de energía 110V pasando por bomba peristáltica de biofiltro, medidores de nivel en fosas sépticas hasta bomba centrífuga StaRite 0.5 HP.

Imagen 19: Instalaciones eléctricas para bomba centrífuga.



- Colocación y sello de tapadera de plástico en biofiltro.
- Llenado de biofiltro utilizando piedrín y ficus.

Imagen 20: Llenado de biofiltro con material filtrante (ficus)



- Transporte y llenado de humedales con piedra de río y piedrín hasta un nivel de 0.60 m.

Imagen 21: Llenado de humedales con piedra de diferente gravimetría.



Imagen 22: Llenado de humedales con piedra de diferente gravimetría por cubeteo.



Proceso de selección y caracterización de los materiales filtrantes.

- Proceso de selección y caracterización de material para biofiltro.

El material filtrante empleado fue desechos de poda de ficus. Las ramas de ficus fueron donadas por la empresa Alimentos, S.A. ya que se podaron varios árboles.

Se puede obtener sin costo ya que proviene de poda de jardines y áreas verdes. Su disponibilidad es durante todo el año.

Se trituraron las ramas de ficus con la ayuda de una máquina trituradora de desechos orgánicos. Luego, se clasificaron los pedazos de ficus a introducir en el biofiltro a los que se le realizaron las siguientes pruebas.

- Diámetro de partícula.
 - Porosidad.
 - Dimensionamiento de piezas.
- Proceso de acondicionamiento de materiales para Humedales de flujo subsuperficial

Para el acondicionamiento de los materiales dentro de los humedales, se colocó piedra de río de 20 cm de diámetro aproximadamente en la entrada y las salidas de ambos humedales.

Una vez realizado, se llenó de grava o piedrín utilizando dos carretas y dos palas. Durante el llenado de piedrín, fue necesario lavar el piedrín con agua ya que tenía tierra y pino de árbol por el lugar en donde se encontraba. Mientras se llenaba el humedal con piedrín y agua, la tierra, pino y basura quedaron en la superficie permitiendo su limpieza.

Fue necesario lavar el piedrín por 3 veces hasta que quedara lo suficientemente limpio y sin pino que pueda afectar el proceso de tratamiento.

Entre las plantas comúnmente utilizadas en humedales, se encuentra *Scripus*(Juncos) y *Phragmites*(Carrizos). Sin embargo, por la dificultad para encontrar dichas especies, con el asesoramiento de la Ing. María Aguilera, se empleó Cartuchos blancos (*Zantedeschiaaethiopica*) y colas de caballo (*Equisetum arvense L*) siendo especies ornamentales muy eficientes para la remoción de contaminantes en humedales de flujo sub-superficial.

Bajo el asesoramiento de la Ing. María Aguilera, se tomaron en cuenta las siguientes observaciones:

- Colocar y pegar con Sicaflex la división en cada humedal, con el fin de tener dentro del humedal las corrientes deseadas.
- Dejar un espacio de 20 cm aproximadamente entre cada planta.

- Colocar piedras de río en las entradas y salidas del humedal.

Los criterios de distribución de las plantas, se hicieron en base a la cantidad de plantas disponibles y se buscó la homogeneidad para así tener una determinación realista de las plantas más eficientes. Por lo que la distribución quedo de la siguiente forma en cada humedal:

- 2 Cartuchos blancos (*Zantedeschiaaethiopica*)
- 4 colas de caballo.(*Equisetum arvense L*)

Imagen 23: Limpieza de piedrín dentro de un humedal.



Imagen 24: Limpieza de piedrín dentro de un humedal.



Imagen 25: Siembra de plantas en ambos humedales.



ARRANQUE DE SISTEMA DE TRATAMIENTO

Con el objetivo de observar el funcionamiento del sistema de tratamiento, se arrancó la bomba centrífuga 0.5 HP regulando la válvula del Bypass. En la primera prueba, el agua residual no llegó hasta la primera cubeta de la fosa séptica, por lo que fue necesario revisar las presiones en cada punto de las cajas de registro.

El problema conllevó a tener que lavar la caja de agua residual, ya que se encontraba con una gran cantidad de sólidos y arena. A la bomba succionar el líquido de la caja, este no era suficiente por lo que se tuvo que subir el nivel del líquido.

Así mismo, se arrancó la bomba dosificadora con el 100% de su capacidad, con el fin de evaluar su funcionamiento y la capacidad que tiene para llenar el biofiltro en un tiempo determinado. El tiempo para el arranque del sistema y evaluación del equipo fue de 1 día.

CALIBRACIÓN DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Para calibrar el sistema, se determinó y reguló el caudal (ml/s) con el que se deseaba trabajar para poder aproximarse al caudal necesario de las bases de diseño del sistema (19.75 L/día).

Con la ayuda de una probeta con capacidad de $25 \pm 0.5 \text{ ml}$, se obtuvo el volumen de flujo que ingresa y sale de los 3 equipos de tratamiento en un determinado tiempo, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 56: Resultados para calibración de caudal de humedales.

Volumen (mL) ± 0.05	Tiempo (s) ± 0.01	Caudal(mL/s)			Caudal (L/día)		
			\pm			\pm	
25	141.3	0.18	\pm	0.00035	15.29	\pm	0.031
25	137.9	0.18	\pm	0.00036	15.66	\pm	0.031
25	133.6	0.19	\pm	0.00037	16.17	\pm	0.032

Imagen 26: Calibración de caudal en humedal utilizando probeta de 25 ml

