

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño, instalación y evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes de un biofiltro para el tratamiento secundario de agua residual a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentado por Luis Angel Pinzón López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2013

Diseño, instalación y evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes de un biofiltro para el tratamiento secundario de agua residual a escala laboratorio

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Diseño, instalación y evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes de un biofiltro para el tratamiento secundario de agua residual a escala laboratorio

Trabajo de graduación presentado por Luis Angel Pinzón López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala

2013

Vo. Bo.:

(f) 

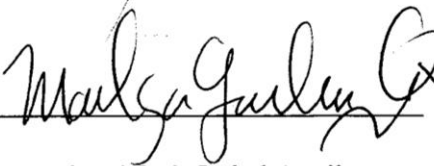
Ingeniera María Isabel Aguilera

Asesora

Tribunal Examinador:

(f) 

Ingeniero Gamaliel Zambrano

(f) 

Ingeniera María Isabel Aguilera

(f) 

Ingeniero Cristián Rossi

Fecha de aprobación: Guatemala, 22 de enero de 2013

PREFACIO

Este trabajo de graduación surge como parte del proyecto de investigación del Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico –FODECYT- Número 041-2011, titulado “Diseño, construcción y evaluación de un sistema de tratamiento natural de agua residual a escala laboratorio”, financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología –SENACYT– y la Universidad del Valle de Guatemala –UVG–.

En primer lugar quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a este punto en mi carrera universitaria, por ayudarme a superar los obstáculos que surgieron durante la realización de este trabajo de graduación así como lo ha hecho a lo largo de toda mi vida y por darme la oportunidad de realizar esta investigación que me dejó grandes enseñanzas de vida tanto en el ámbito profesional como en el personal.

Además, quiero agradecer a mis padres, quienes me han brindado su cariño y apoyo incondicional. Gracias por los sacrificios que han realizado y por sus consejos. A mi hermano, quien siempre me ha apoyado y a quien tengo un gran cariño. Al resto de mi familia, quienes me han ayudado a salir adelante. A mis amigos, en especial a los que colaboraron en la realización de este trabajo de graduación.

Agradezco a la Asamblea de Presidentes de los Colegios Profesionales por permitir la construcción del sistema de tratamiento natural de aguas residuales en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales, por confiar en el equipo de investigación del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala y por el apoyo brindado al momento de la instalación del mismo. Un agradecimiento especial al personal de mantenimiento de la Asamblea por la ayuda brindada y el trabajo realizado, los cuales permitieron que el objetivo de construir el sistema fuese alcanzado.

También agradezco al Ing. Gamaliel Zambrano por la confianza demostrada hacia mi persona y su apoyo, el cual facilitó la construcción del sistema de tratamiento en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales. Además, el Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala, bajo su dirección, fue clave en la asignación de los recursos necesarios para la instalación y evaluación del sistema. Al Ing. Cristián Rossi por incluirme en el equipo de investigación de este proyecto, por toda la confianza, consejos y paciencia demostrada hacia mi persona, a la Ing. María Isabel Aguilera por su asesoramiento y ayuda en la realización de este trabajo de graduación y al Sr. Cristian García por el tiempo que dedicó desinteresadamente para ayudar en la construcción del sistema de tratamiento.

Espero que este trabajo de investigación sea un pequeño paso en la dirección correcta para alcanzar una Guatemala más limpia y sirva como incentivo para la realización de nuevas investigaciones en nuestro país relacionadas con el tratamiento natural de aguas residuales, ya que es una tecnología que considero con mucho potencial.

Luis Angel Pinzón López

ÍNDICE GENERAL

	Página
PREFACIO	vi
ÍNDICE GENERAL	viii
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	xv
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	2
A. Agua residual	2
B. Características del agua residual	2
C. Composición del agua residual doméstica no tratada	3
D. Parámetros a evaluar en la planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales.....	4
E. Operaciones y procesos unitarios de una planta de tratamiento de agua residual	7
F. Sistemas naturales para el tratamiento secundario de agua residual.....	11
G. Humedales.....	12
H. Biofiltración sobre lecho orgánico	13
III. ANTECEDENTES	16
A. Situación del recurso hídrico en Guatemala.....	16

B.	Contaminación del agua en Guatemala.....	17
C.	Legislación	18
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	20
V.	OBJETIVOS	22
A.	Objetivo general	22
B.	Objetivos específicos	22
VI.	PROBLEMA A RESOLVER.....	23
VII.	METODOLOGÍA.....	24
VIII.	RESULTADOS	27
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	37
X.	CONCLUSIONES	44
XI.	RECOMENDACIONES	46
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
XIII.	APÉNDICE	51
A.	Especificaciones de tanques, equipos y válvulas de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales	51
B.	Diseño de fosa séptica.....	56
C.	Diseño del biofiltro con ficus como material filtrante.	57
1.	Datos originales.....	57
2.	Cálculos.....	57
3.	Datos calculados intermedios.....	60
D.	Caracterización del material filtrante	61
1.	Datos originales.....	61

2.	Análisis estadístico.....	63
E.	Determinación de la porosidad del material filtrante.....	68
1.	Datos originales.....	68
2.	Cálculos.....	68
3.	Datos calculados intermedios.....	68
F.	Balance de masa del biofiltro.....	69
G.	Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes.....	71
1.	Datos originales.....	71
2.	Cálculos.....	73
3.	Datos calculados intermedios.....	76
H.	Métodos de análisis realizados al agua residual.....	81
1.	Medición de pH.....	81
2.	Medición de conductividad.....	81
3.	Medición de sólidos suspendidos.....	82
5.	Medición de fósforo reactivo.....	84
6.	Medición de coliformes totales y E. Coli.....	84
I.	Especificaciones técnicas de equipos instalados en la planta de tratamiento.....	85
1.	Bomba centrífuga.....	85
2.	Bomba dosificadora.....	87
3.	Bomba de aire.....	88
J.	Registro gráfico de la construcción, instalación y operación de la planta de tratamiento.....	89

1. Recolección y procesamiento de material filtrante	89
2. Instalación de equipo para tratamiento secundario de agua residual	91
3. Conexiones a proceso e instalaciones eléctricas de la planta de tratamiento.	93
4. Construcción de biofiltro.....	96
5. Planta de tratamiento con sistemas naturales.	98
K. Costos de construcción de la planta de tratamiento.	103
L. Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales	108
XIV. GLOSARIO.....	109

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Composición típica de agua residual domésticas no tratada.	4
2. Donadores de electrones y productos finales en reacciones biológicas en el tratamiento secundario de agua residual	9
3. Uso del agua en el año 2006 y uso potencial del agua en el año 2025 en Guatemala.	16
4. Caudal máximo de agua residual a tratar en el biofiltro a partir del parámetro limitante y caudal experimental.....	29
5. Eficiencia de remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales con base en diferentes parámetros.....	29
6. Eficiencia de remoción de contaminantes del biofiltro con lecho orgánico residuales con sistemas naturales con base en diferentes parámetros.....	29
7. Variación de pH y conductividad eléctrica en relación al afluente y efluente del biofiltro y de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.....	29
8. Costo de construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.....	36
9. Especificaciones de tanques de almacenamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales	51
10. Especificaciones de bombas de la planta de tratamiento de aguas residuales.	52

11. Especificaciones de equipos para el tratamiento secundario del agua residual con sistemas naturales.	53
12. Equipos para el tratamiento secundario del agua residual con sistemas naturales.	54
13. Cargas máximas permitidas para el tratamiento de agua residual en un biofiltro, determinadas experimentalmente por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).	57
14. Caudal máximo de agua residual a tratar en el biofiltro, de acuerdo a las cargas de DBO y SST.	60
15. Largo, ancho y alto de una muestra aleatoria de 100 ramas de ficus trituradas.	61
16. Análisis estadístico del largo de la muestra de ramas de ficus trituradas.	63
17. Análisis estadístico del ancho de la muestra de ramas de ficus trituradas.	64
18. Análisis estadístico del alto de la muestra de ramas de ficus trituradas.	65
19. Dimensiones promedio de las ramas trituradas de ficus.	66
20. Volumen de espacios vacíos para un volumen de piedrín de 1000 mL.	68
21. Porosidad del piedrín.	68
22. Parámetros del afluente al inicio de la operación de la planta de tratamiento.	71
23. pH del agua residual tratada.	71
24. Conductividad eléctrica del agua residual tratada.	72
25. Sólidos suspendidos totales en el agua residual tratada.	72
26. Nitrógeno en forma de NO_3^- en el agua residual tratada.	73
27. Fósforo en forma de PO_4^{3-} en el agua residual tratada.	73
28. Sólidos suspendidos totales promedio en diferentes puntos de muestreo.	76
29. Demanda bioquímica de oxígeno promedio en diferentes puntos de muestreo.	77

30. Concentración de nitrógeno en forma de NO_3^- promedio en diferentes puntos de muestreo.	77
31. Concentración de fósforo en forma de PO_4^{3-} promedio en diferentes puntos de muestreo.	77
32. pH promedio en diferentes puntos de muestreo.	78
33. Conductividad eléctrica promedio en diferentes puntos de muestreo.	78
34. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales a la salida de diferentes puntos de muestreo.	78
35. Porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a la salida de diferentes puntos de muestreo.	79
36. Porcentaje de remoción de nitrógeno en forma de NO_3^- a la salida de diferentes puntos de muestreo.	79
37. Porcentaje de remoción de fósforo en forma de PO_4^{3-} a la salida de diferentes puntos de muestreo.	79
38. Porcentaje de variación del pH a la salida de diferentes puntos de muestreo.	80
39. Porcentaje de variación de la conductividad eléctrica a la salida de diferentes puntos de muestreo.	80
40. Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga utilizada para el ingreso de agua residual a la planta.	85
41. Especificaciones técnicas de la bomba dosificadora utilizada para el ingreso de agua residual al biofiltro.	87
42. Especificaciones técnicas de la bomba de aire utilizada para el ingreso de aire al biofiltro.	88
43. Costo de mano de obra para la construcción de la planta de tratamiento.	104
44. Costo de materiales y equipo utilizados para la construcción de la planta de tratamiento.	105
45. Características geográficas del Edificio de los Colegios Profesionales.	108

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
1. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales	27
2. Plano de vista de planta de sistema de tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio	28
3. Comportamiento en el tiempo de la concentración de sólidos suspendidos en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	30
4. Comportamiento en el tiempo de la demanda bioquímica de oxígeno en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	31
5. Comportamiento en el tiempo de la conductividad eléctrica en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	32
6. Comportamiento en el tiempo del pH en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	33
7. Comportamiento en el tiempo de la concentración de nitrógeno en forma de NO_3^- en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	34
8. Comportamiento en el tiempo de la concentración de fósforo en forma de PO_4^{3-} en diferentes puntos de la planta de tratamiento.	35
9. Histograma de frecuencia porcentual para el largo de las ramas de ficus trituradas.	66
10. Histograma de frecuencia porcentual para el ancho de las ramas de ficus trituradas.	67

11. Histograma de frecuencia porcentual para el alto de las ramas de ficus trituradas.	67
12. Diagrama de entradas y salidas del biofiltro.....	69
13. Vista lateral de la bomba centrífuga STA-RITE ® SNC-L.....	86
14. Curva característica de la bomba centrífuga STA-RITE ® SNC-L.	86
15. Bomba dosificadora PULSAFEEDER ® Pulsatron C Plus.....	87
16. Vista frontal de la bomba Hagen ® Elite 800.....	88
17. Árboles de ficus podados, donados por una empresa de alimentos.....	89
18. Ramas de ficus podadas.....	89
19. Trituración mecánica de las ramas de ficus con el equipo TRAPP® TR200.	90
20. Secado solar de ramas de ficus trituradas.	90
21. Tamizado de ramas de ficus trituradas en una malla con ½" de apertura.....	90
22. Selección manual del material filtrante a partir de ramas de ficus trituradas.	91
23. Terreno seleccionado para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales.....	91
24. Fundición de bases de cemento para soporte de fosa séptica y estructura metálica para el biofiltro.	91
25. Fundición de bases de cemento para soporte de los humedales de flujo subterráneo.....	92
26. Colocación de la estructura metálica del biofiltro y tanques parahumedales.	92
27. Colocación de cubetas con tapadera de 40 L de capacidad para fosa séptica.	92
28. Colocación de tubería de PVC 1/2" y poliducto 1" en zanja de 15 cm de profundidad.....	93

29. Fundición de caja para bomba centrífuga Sta-Rite ®.....	93
30. Contactor utilizado para la bomba centrífuga.....	94
31. Caja de interruptores de corriente general, con un interruptor de corriente instalado de 40 A, 240 V.	94
32. Caja metálica de 70x35x30 cm para colocación de contactor, selector de tres posiciones, botón Start/Stop, bomba dosificadora y bomba de aire.	94
33. Instalación de caja metálica de 70x35x30 cm adjunta a la estructura metálica del biofiltro.....	95
34. Detalle interno del motor de la bomba centrífuga.	95
35. Estructura metálica que soporta el biofiltro.....	96
36. Colocación de tapadera de PVC al tubo de acrílico del biofiltro.	96
37. Llenado del biofiltro con piedrín.	97
38. Llenado del biofiltro con las ramas de ficus trituradas.....	97
39. Pruebas de arranque del biofiltro con agua potable.....	98
40. Planta de tratamiento con sistemas naturales, ubicada en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales.....	98
41. Vista frontal de la planta de tratamiento con sistemas naturales.	99
42. Biofiltro al día 28 de operación de la planta.....	99
43. Primer humedal al día 28 de operación de la planta.	100
44. Primer humedal al día 49 de operación de la planta.	100
45. Material filtrante orgánico al inicio de la operación de la planta.	101
46. Material filtrante orgánico al día 28 de operación.....	101
47. Material filtrante orgánico al día 49 de operación.....	102
48. Material filtrante orgánico al día 56 de operación.....	102
49. Vista satelital de la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.....	108

RESUMEN

El objetivo general de este trabajo de graduación fue diseñar e instalar un biofiltro con lecho orgánico, trozos de ramas de ficus, a escala laboratorio para el tratamiento secundario de agua residual doméstica generada en el Edificio de los Colegios Profesionales, ubicado en la ciudad de Guatemala, para evaluar su eficiencia en la remoción de contaminantes. Este biofiltro formó parte de un sistema de tratamiento natural de agua residual, que además constó de una fosa séptica para el tratamiento primario del agua residual y de dos humedales de flujo subsuperficial con plantas emergentes (colas de caballo y cartuchos blancos) conectados en serie con el biofiltro para el tratamiento secundario. El biofiltro con ficus como material orgánico filtrante tuvo una eficiencia de $43.28 \pm 25.77\%$ para la remoción de sólidos suspendidos totales, $7.15 \pm 8.35\%$ para el nitrógeno en forma de nitratos, un aumento de $115.28 \pm 103.2\%$ de la demanda bioquímica de oxígeno y un aumento de $2.08 \pm 0.12\%$ para el fósforo en forma de fosfatos. Además, la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema de tratamiento natural de agua residual fue de $96.40 \pm 96.88\%$ para la remoción de sólidos suspendidos totales, $84.15 \pm 72.12\%$ para la demanda bioquímica de oxígeno, $95.69 \pm 51.59\%$ para el nitrógeno en forma de nitratos y de $59.05 \pm 1.70\%$ para el fósforo en forma de fosfatos. Se concluyó que el sistema de tratamiento natural de agua residual es eficiente para la remoción de los contaminantes en el agua residual doméstica generada en el Edificio de los Colegios Profesionales para un tiempo de operación de 63 días y se recomienda operar la planta de tratamiento durante un tiempo más prolongado para medir la compactación del ficus en el biofiltro y así investigar su comportamiento como material filtrante orgánico en un sistema estable.

ABSTRACT

The main purpose of this work was to design and build a biofilter with organic bed, pieces of branches of ficus, at laboratory scale for the secondary treatment of the domestic wastewater generated at Edificio de los Colegios Profesionales, located in Guatemala City, in order to evaluate its contaminants removal efficiency. This biofilter was part of a natural wastewater treatment system, which also had a septic tank for the primary treatment of the wastewater and two wetlands with emergent plants (horsetails and calla lilies) connected in series with the biofilter for the secondary treatment. The biofilter, with ficus pieces as an organic filter, had an efficiency of $43.28 \pm 25.77\%$ for the removal of total suspended solids, $7.15 \pm 8.35\%$ for the nitrogen in the form of nitrates, an increase of $115.28 \pm 103.2\%$ for the biochemical oxygen demand (BOD) and an increase of $2.08 \pm 0.12\%$ for the phosphorus in the form of phosphates. In addition, the contaminants removal efficiency for the natural wastewater treatment system was $96.40 \pm 96.88\%$ for the removal of total suspended solids, $84.15 \pm 72.12\%$ for the BOD, $95.69 \pm 51.59\%$ for the nitrogen in the form of nitrates and $59.05 \pm 1.70\%$ for the phosphorus in the form of phosphates. It was concluded that the natural wastewater treatment system was efficient for the removal of contaminants generated at Edificio de los Colegios Profesionales for an operating time of 63 days and it was recommended to operate the system for a longer period of time in order to measure the ficus compaction and thus, to study its behavior as an organic filter in a stable system.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua superficial en Guatemala ha provocado enfermedades dérmicas y gastrointestinales en la población, debido al escaso tratamiento que ésta recibe cuando es descargada a ríos y lagos. Muchas comunidades en el interior del país no tratan sus aguas residuales debido a que la tecnología disponible es muy cara, requiere mucho mantenimiento y, sobre todo, existe una falta de conocimiento acerca del tema.

Una alternativa para la remoción de contaminantes en el agua residual son los sistemas naturales, los cuales incluyen biofiltros con lecho orgánico y humedales construidos de flujo subsuperficial. Ambas tecnologías poseen una alta eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales (CF). La remoción de nitrógeno y fósforo es modesta, pero en términos generales tiende a ser mayor que en las tecnologías convencionales.

Este trabajo de graduación consistió en el diseño e instalación de un biofiltro con ramas de ficus como lecho orgánico para tratar agua residual doméstica generada en el Edificio de los Colegios Profesionales, ubicado en la 0 calle 15-46 zona 15 Colonia El Maestro, Guatemala, dentro de una planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales, a escala laboratorio. Dicha planta incluye, además del biofiltro, una fosa séptica y dos humedales de flujo subsuperficial con plantas emergentes (cola de caballo y cartuchos blancos) conectados en serie. Se espera que la calidad del agua tratada en la planta, al momento en el que el sistema esté estabilizado (un año de operación) sea tal que permita, como mínimo, su reúso para riego.

Además, se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes tanto para el efluente del biofiltro como para el de la planta en general por medio de los siguientes parámetros: DBO_5 , SST, CF, nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), conductividad y pH.

II. MARCO TEÓRICO

A. Agua residual

El agua residual es una combinación de líquidos y residuos sólidos transportados en ésta que son eliminados de residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, así como el agua subterránea, superficial o pluvial que pudiera estar presente en la misma.

El agua residual no tratada provoca malos olores, además de contener microorganismos patógenos que puede habitar en el tracto intestinal de los humanos; esto debido a la descomposición de la materia orgánica que contiene el agua. Además, contiene nutrientes que promueven el crecimiento de plantas acuáticas y puede llegar a contener materiales tóxicos, potencialmente mutágenos o carcinógenos.

Es por esto que, para proteger la salud pública y el ambiente, es importante remover el agua residual de las fuentes de generación, tratarla y reusar, o dispersarla al ambiente después del tratamiento.

Para alcanzar dicho objetivo, es necesario tener conocimiento acerca de los constituyentes de mayor impacto ambiental en el agua residual, el impacto de estos constituyentes cuando el agua residual es dispersada al ambiente, la transformación y el destino a largo plazo de los constituyentes en los procesos de tratamiento, los métodos de tratamiento que pueden ser utilizados para remover o modificar los constituyentes del agua residual y los métodos para el benéfico uso o disposición de lodos generados por los sistemas de tratamiento. (Metcalf & Eddy, 2003:1)

B. Características del agua residual

Los cambios tecnológicos que ocurren en la manufactura provocan un cambio en los compuestos descargados, lo cual afecta las características del agua residual. Muchos

compuestos generados en los procesos industriales son difíciles y costosos de tratar por métodos convencionales. Por lo tanto, el pre tratamiento efectivo se convierte en una parte esencial de un programa de manejo general de la calidad de agua.

Sin embargo, algunos contaminantes regulados todavía son vertidos a los colectores municipales de agua municipal, por lo que en el futuro, para prevenir la contaminación, cada compuesto que entre a una corriente de aguas residuales debe contar con un estudio de impacto ambiental que determine la viabilidad del tratamiento de dicho compuesto. Si un compuesto no puede ser tratado efectivamente, entonces no debe ser utilizado.

Para la caracterización del agua residual se utilizan técnicas analíticas que se apoyan en instrumentación nueva y sofisticada. Las concentraciones de los constituyentes del agua residual suelen darse en miligramos por litro (mg/L); sin embargo, las mediciones en microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$) y nanogramos por litro (ng/L) son ahora comunes.

Debido a las características cambiantes del agua residual y la imposición de parámetros más estrictos para las descargas de aguas residuales, se le ha dado un mayor énfasis a su caracterización. Debido a que el conocimiento acerca de la naturaleza del agua residual es fundamental para el diseño y operación de facilidades que permitan su recolección, tratamiento, y reúso, es necesario conocer los constituyentes del agua residual. (Metcalf & Eddy, 2003:9)

C. Composición del agua residual doméstica no tratada

El agua residual doméstica es aquella que es descargada por residencias e instalaciones comerciales, institucionales o de índole similar. La principal fuente de dichas aguas en una comunidad son las áreas residenciales y los distritos comerciales. (Metcalf & Eddy, 2003:154)

Datos típicos para la composición del agua residual doméstica no tratada, obtenida de los sistemas de drenajes de aguas negras en los Estados Unidos, son presentados en el cuadro 1. Los datos en el cuadro 1 para una concentración baja corresponden al caudal

de 750 L/persona-día, para una concentración media al caudal de 460 L/persona-día y para una concentración alta al caudal de 240 L/persona-día. (Metcalf & Eddy, 2003:185)

Cuadro 1: Composición típica de agua residual domésticas no tratada.

Parámetro	Unidad	Baja concentración	Media concentración	Alta concentración
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	120	210	400
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ , 20 °C)	mg/L	110	190	350
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	430	800
Nitrógeno total (NT)	mg/L	20	40	70
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total (PT)	mg/L	4	7	12
Coliformes totales (CF)	NMP	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ¹⁰
Coliformes fecales (CF)	NMP	10 ³ -10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁵ -10 ⁸

(Metcalf & Eddy, 2003:186)

D. Parámetros a evaluar en la planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales

Tanto las concentraciones de los contaminantes como los caudales de aguas residuales deben conocerse para diseñar un sistema de tratamiento. Ambos ayudan a determinar las cargas contaminantes.

En general, se analiza el pH, la conductividad eléctrica, la materia en suspensión, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), los nutrientes (nitrógeno y fósforo), y en algunos casos los microorganismos indicadores de contaminación fecal si se va a reutilizar el efluente depurado. (García y Corzo, 2008:23)

1. pH: La concentración de iones de hidrógeno es un parámetro importante tanto para agua natural como residual. La forma usual de expresar esta concentración es con el pH, el cual es definido como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno.

El rango adecuado de pH para la existencia de la mayoría de vida es muy reducido y crítico, encontrándose en un rango de 6 a 9. El agua residual con un pH bajo es muy difícil de tratar por métodos biológicos y si no es modificado, su descarga puede alterar el pH en las aguas naturales. Para los efluentes descargados al ambiente, el rango de pH permitido varía entre 6.5 a 8.5. (Metcalf & Eddy, 2003:57)

2. Sólidos suspendidos totales (SST): Son una porción de los sólidos totales (ST) retenidos en un filtro con un tamaño de poro específico, medidos después de ser secados a 105 °C. El filtro más utilizado es el de fibra de vidrio Whatman, el cual tiene un tamaño de poro nominal de 1.58 μm . (Metcalf & Eddy, 2003:43)

3. Demanda química de oxígeno (DQO): Es un parámetro utilizado para determinar la cantidad de oxígeno equivalente en la materia orgánica que puede ser oxidado por un agente químico oxidante fuerte, dicromato de potasio, en un medio ácido. (Davis, 2010, p. 18-7)

4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5): Es el parámetro más utilizado para la determinación de contaminación orgánica tanto en agua superficial como residual. Dicha determinación implica la medida del oxígeno disuelto usado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Es usado actualmente como parámetro para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que es requerida para estabilizar la materia orgánica presente, para determinar el tamaño de una planta de tratamiento de aguas residuales, para medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y para determinar el cumplimiento con respecto a las descargas límites permitidas. (Metcalf & Eddy, 2003:81)

El DQO en el agua residual, en general, debe ser mayor al DBO_5 debido a que una mayor cantidad de compuestos puede ser oxidada en forma química que en forma biológica y porque el DBO_5 no equivale a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). (Davis, 2010:18-7)

Esto se debe a que la oxidación bioquímica teóricamente toma un tiempo infinito en completarse debido a que la velocidad de oxidación se asume como proporcional a la cantidad de materia orgánica remanente. En un período de 20 días, la oxidación de la materia orgánica de

origen carbónico está completada en un 95 a 99% y en un período de 5 días, utilizado para una prueba de DBO_5 , la oxidación está en un 60 a 70% completa. (Metcalf & Eddy, 2003:84)

Valores típicos para la relación DBO/DQO para aguas municipales no tratadas están en el rango de 0.3 a 0.8. Si la relación DBO/DQO es igual o mayor a 0.5, el agua residual se considera de fácil tratamiento por métodos biológicos. Si es menor a 0.3, puede que el agua residual tenga algunos componentes tóxicos o que se requieran microorganismos aclimatados para su estabilización. (Metcalf & Eddy, 2003:96)

5. Nitrógeno total (NT): El nitrógeno es un elemento esencial para la síntesis de proteína, por lo que se requiere evaluar su presencia en el agua residual para determinar la viabilidad de su tratamiento por medios biológicos. En caso que el nitrógeno presente sea insuficiente, se necesita la adición de nitrógeno para hacer tratable el agua residual.

Las formas más comunes e importantes de nitrógeno en el agua residual, con su correspondiente estado de oxidación, son: el amoníaco (NH_3 , -III), amonio (NH_4^+ , -III), gas nitrógeno (N_2 , 0), ion nitrito (NO_2^- , +III) y ion nitrato (NO_3^- , +V). El estado de oxidación de la mayoría de compuestos orgánicos es de -III.

El nitrógeno total es la suma de nitrógeno orgánico, amoníaco, amonio, nitritos y nitratos. El nitrógeno orgánico proviene de una mezcla compleja de compuestos, que incluye aminoácidos, amino azúcares y proteínas. (Metcalf & Eddy, 2003:60)

6. Fósforo total (PT): El fósforo también es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos. Debido al crecimiento de algas nocivas en aguas superficiales, el interés en controlar la cantidad de compuestos fosforados en las descargas municipales o industriales ha aumentado.

El fósforo puede aparecer de diversas formas en el agua residual. En ellas están los ortofosfatos (PO_3^- , HPO_2^- , H_2PO_4^- , H_3PO_4), los polifosfatos y el fosfato orgánico. Juntos, son llamados fósforo total. (Davis, 2010:18-7)

7. Coliformes fecales (CF): El agua sirve como medio de transporte para ciertas enfermedades que pueden ser transmitidas por vía fecal-oral. Es por esto que se requiere de organismos indicadores que estén presentes cuando existe contaminación fecal. Dichos microorganismos deben ser constantes, abundantes y exclusivos de la materia fecal, además de ser capaces de desarrollarse extraintestinalmente y tener una sobrevivencia similar a los patógenos intestinales.

El grupo de bacterias coliformes fecales comprende organismos gram-negativos, tanto aerobios como anaerobios facultativos, no esporulados, que fermentan lactosa y tienen la capacidad de producir gas en un lapso máximo de 48 horas de incubación a una temperatura de 44.5 ± 0.1 °C. Aunque este grupo no incluye a ninguna especie específica, la más representativa es *Escherichia coli*. (Camacho, 2010)

Las concentraciones de bacterias coliformes se reportan como el número más probable (NMP) por 100 mL. El NMP se basa en la aplicación de la distribución de Poisson para valores extremos en el análisis del número de resultados positivos y negativos obtenidos al analizar múltiples porciones del mismo volumen y en porciones que constituyen una serie geométrica. (Metcalf & Eddy, 2003:121)

E. Operaciones y procesos unitarios de una planta de tratamiento de agua residual

Los métodos por los cuales se trata el agua residual por medio de la aplicación de fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias. Por otra parte, los métodos en donde la remoción de contaminantes se da por medio de reacciones químicas o biológicas se llaman procesos unitarios. La combinación de ambos se agrupa en niveles de tratamiento, conocidos como tratamiento preliminar o pre-tratamiento, primario, secundario y terciario. (Metcalf & Eddy, 2003:11)

1. Pre-tratamiento: Es un conjunto de procesos realizados al inicio del sistema de tratamiento de agua residual que tienen como objetivo eliminar sólidos gruesos (ramas, plásticos, piedras, etc.), grasas y arenas que pueden afectar, obstruir o dañar el sistema en los procesos posteriores.

En los sistemas de pequeños municipios (con menos de 2000 habitantes) es común utilizar un canal, donde se encuentran en forma sucesiva una zona en la que se ubica un aliviadero de exceso de caudal, otra zona en la que se sitúa una rejilla de gruesos y finos, y una última zona de desarenado. Al final del canal se puede colocar un desengrasante, en el caso que la cantidad de aceites y grasas descargados sean altos. De lo contrario, los tanques Imhoff o las fosas sépticas en el tratamiento primario pueden remover dichos compuestos. (García y Corzo, 2008:33)

2. Tratamiento primario: Es el primer proceso en una planta de tratamiento de agua residual en donde se disminuye considerablemente la cantidad de sólidos suspendidos, los cuales contribuyen significativamente a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) del agua residual. También disminuye el consumo energético y problemas en la operación de la planta en los procesos posteriores. Por otra parte, sirve para disminuir la cantidad de material particulado inerte y otros materiales que no hayan sido removidos en el pre-tratamiento. Estos materiales son: grasas, aceites, plásticos, hojas, cabello, y cualquier otro material flotante.

La principal forma de tratamiento primario del agua residual es la sedimentación. Por lo tanto, es llamado sedimentación primaria. Es la más vieja y más utilizada de las operaciones unitarias en el tratamiento de agua residual. (Davis, 2010:21-1)

En el caso de tratamiento de agua residual para pequeñas comunidades, se pueden emplear fosas sépticas. Éstas permiten la sedimentación de la materia en suspensión y su acumulación en el fondo en forma de que los lodos se descompongan en forma anaeróbica. Este proceso se llama digestión y permite disminuir el volumen de lodos gracias a la producción de gases, principalmente CO₂ y CH₄. El gas generado sube a la superficie acarreado sólidos, los cuales forman una capa de espuma bastante espesa. La falta de esta capa indica que la fosa séptica no está operando adecuadamente. (García y Corzo, 2008:41)

3. Tratamiento secundario: Utiliza los procesos por los cuales los microorganismos, principalmente bacterias, estabilizan los componentes del agua. La mezcla de microorganismos es denominada biomasa. Una porción del agua es oxidada, liberando energía, y el resto es utilizada como elemento constitutivo del protoplasma. Por lo tanto, lo que hace que la biomasa estabilice el agua es que le da la energía y los componentes químicos necesarios para su reproducción. El proceso de conversión biológico se puede resumir en la siguiente ecuación:

Residuo (donador de electrones) + Biomasa + Receptor de electrones

$\xrightarrow{\text{Condiciones ambientales adecuadas}}$ Más biomasa + Donador de electrones oxidado + Receptor de electrones reducido

Ecuación 1

El residuo normalmente sirve como un donador de electrones, necesitando que haya un receptor de electrones. Una variedad de sustancias puede ser utilizada como donador de electrones, entre las cuales están: oxígeno molecular (O₂), dióxido de carbono (CO₂), formas

oxidadas de nitrógeno, azufre y sustancias orgánicas. Las características de los productos obtenidos dependen del donador de electrones. (Perry, 2008, p. 22-66)

Cuadro 2: Donadores de electrones y productos finales en reacciones biológicas en el tratamiento secundario de agua residual

Donador de electrones	Producto obtenido
Oxígeno molecular	Agua, CO ₂ , nitrógeno oxidado
Nitrógeno oxidado	N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ , H ₂ O
Azufre oxidado	H ₂ S, S, CO ₂ , H ₂ O
CO ₂ , ácido acético, ácido fórmico	CH ₄ , CO ₂ , H ₂
Compuestos orgánicos complejos	H ₂ , compuestos orgánicos simples, CO ₂ , H ₂ O

(Perry, 2008:22-66)

Las condiciones de reacción adecuadas son requeridas para que la oxido-reducción planteada en la ecuación 1 se lleve a cabo. Estas condiciones son requeridas por la biomasa, y no por el donador o receptor de electrones. Dichas condiciones ambientales incluyen el pH, la temperatura, los nutrientes, el balance iónico, entre otras. En general, la biomasa puede funcionar en un rango amplio de pH, generalmente de 5 a 9. Sin embargo, algunos microorganismos requieren un rango de pH más reducido. Es importante mantener el pH a un nivel relativamente constante en todo el proceso, así como mantenerlo en el rango antes mencionado. De igual manera ocurre con la temperatura, ya que muchos microorganismos pueden sobrevivir en un rango amplio de temperatura pero no se ajustan adecuadamente a fluctuaciones pequeñas, incluso de algunos grados centígrados. Existen tres rangos de temperatura principales en los cuales un organismo puede sobrevivir. El rango psicrófilo (5 a 20 °C), el rango mesófilo (20 a 45 °C) y el rango termófilo (45 a 70 °C). Generalmente, los microorganismos que funcionan bien en uno de estos rangos, no pueden funcionar eficientemente en el resto de rangos. Debido a que es económicamente poco viable ajustar la temperatura de tratamiento del agua residual, la mayoría de procesos se realizan en el rango mesófilo.

Todos los microorganismos requieren una cantidad variada de un gran número de nutrientes. Son requeridos debido a que son componentes necesarios del protoplasma bacterial. Los nutrientes pueden ser divididos en tres tipos: macro, menores y micro. Los macronutrientes son aquellos que abarcan la mayoría de la biomasa. Tienen la fórmula molecular comúnmente aceptada para la biomasa (C₆₀H₈₇O₂₃N₁₂P). El carbono, hidrógeno y oxígeno proviene normalmente del residuo y el agua, pero el nitrógeno y el fósforo deben ser agregados en el caso

del tratamiento de agua industrial. Se recomienda que la masa de nitrógeno sea al menos el 5% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la masa de fósforo sea al menos el 20% de la masa de nitrógeno. Los nutrientes menores incluyen los compuestos inorgánicos típicos que se pueden encontrar en el agua: sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, cloro y sulfatos. El rango de concentraciones requerido en el agua residual para estos nutrientes menores es de 1 a 100 mg/L. Los micronutrientes incluyen sustancias que normalmente se refieren como metales traza y vitaminas. Las sustancias referidas como vitaminas serán requeridas únicamente si los microorganismos presentes no tienen la capacidad de generar sus propias vitaminas. Los micronutrientes más comunes son: cobre, cobalto, níquel, manganeso, boro, vanadio, zinc, plomo, molibdeno, vitaminas orgánicas o aminoácidos. Estos nutrientes deben estar en una concentración de 1 a 100 µg/L.

La cantidad de biomasa aumenta en el tratamiento secundario con respecto a la que entró. Esto tiene la ventaja de que existe una reproducción continua de los microorganismos que son requeridos para estabilizar el agua. Sin embargo, el nivel de microorganismos puede aumentar de tal manera que el proceso en sí mate a los microorganismos. Estos organismos se refieren comúnmente como lodos.

El tratamiento secundario basado en procesos biológicos es el más utilizado para el tratamiento de agua residual industrial debido a su bajo costo y que la mayoría de sustancias pueden ser estabilizadas. Sin embargo, algunas sustancias son difíciles de degradar biológicamente y no hay una forma de predecir la biodegradabilidad de un compuesto orgánico específico; se debe depender de la experiencia y las pruebas en el laboratorio. (Perry, 2008:22-66)

4. Tratamiento terciario: Un tratamiento posterior al secundario se debe realizar al reconocer alguno de los siguientes casos:

- a. El aumento poblacional provoca un incremento de la carga orgánica y los sólidos suspendidos que están siendo descargados a ríos, lagos y corrientes de agua.
- b. La necesidad de aumentar la remoción de sólidos suspendidos, para proveer una desinfección más eficiente del agua en el sistema.
- c. La necesidad de disminuir nutrientes para limitar la eutrofización en cuerpos de agua sensibles.
- d. La necesidad de remover constituyentes del agua que evitan o inhiben su uso posterior para otras aplicaciones.

En los años 1970, estos procesos eran llamados “tratamiento avanzado de agua residual” debido a que utilizaban técnicas que eran más avanzadas que los métodos de tratamiento secundarios. En las últimas tres décadas, muchas de esas tecnologías han sido incorporadas directamente en los tratamientos secundarios, como la remoción de nutrientes, o se han vuelto convencionales debido a la necesidad de cumplir con los límites de descarga permitidos.

Los procesos de tratamiento de agua terciarios incluyen la precipitación química, la filtración granular, la filtración por membranas y la adsorción de carbono. (Davis, 2010: 26-2)

F. Sistemas naturales para el tratamiento secundario de agua residual

Un sistema natural es capaz de remover contaminantes en el agua residual por medio de mecanismos y procesos naturales que no involucran el uso de energía externa ni de productos químicos al mismo. En estos sistemas se aprovecha la acción conjunta de diferentes comunidades de microorganismos para remover los contaminantes.

A diferencia de los sistemas de tratamiento de agua residual convencionales, los sistemas naturales requieren bajo consumo energético pero requieren una mayor área superficial para lograr la remoción deseada de contaminantes en el agua residual.

En las últimas décadas, dichos sistemas han tenido mucho auge debido a las ventajas que estos presentan, entre las cuales se pueden mencionar: costos de inversión competitivos, poco personal requerido para el mantenimiento del sistema, gastos de energía eléctrica muy bajos y poca generación de lodos.

Los sistemas naturales se pueden dividir en dos categorías, según dónde tenga lugar el tratamiento del agua residual: los sistemas basados en la aplicación del agua en el terreno y los basados en los procesos que suceden en la masa de agua.

Los sistemas basados en la aplicación del agua en el terreno dependen en gran medida de las interacciones entre el agua intersticial y la biopelícula que se adhiere sobre el sustrato sólido. De este tipo existen aplicaciones subsuperficiales y superficiales. Las subsuperficiales refieren a tecnologías tales como: zanjas y lechos filtrantes y humedales construidos con flujo subsuperficial. Las superficiales incluyen las tecnologías de: filtros verdes, infiltración-percolación y filtros de arena.

Por otra parte, los sistemas basados en los procesos que suceden en la masa de agua incluyen las tecnologías de: sistemas con plantas flotantes, lagunaje natural y humedales construidos con flujo superficial o flujo libre. (García y Corzo, 2008:1)

G. Humedales

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas por una duración y frecuencia tales que sean suficientes para que éstos tengan siempre condiciones saturadas. El nivel de agua en estos suele no superar los 60 cm, contando con plantas emergentes tales como espadañas, carrizos y juncos. Dichas plantas proveen un área superficial en la cual se puede formar una biopelícula, además de permitir la filtración y adsorción de los constituyentes de agua residual, la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controlar el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

La aplicación de humedales en el tratamiento de aguas residuales está condicionada por: la fijación física de los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, la utilización y transformación de los elementos por medio de microorganismos y los niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo energético y poco mantenimiento.

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales para el tratamiento de agua residual: sistemas a flujo libre (FWS) y de flujo subsuperficial (SFS). Los sistemas FWS consisten en balsas o canales, con suelo impermeabilizado o con una barrera subsuperficial, plantas emergentes y niveles de agua poco profundos (10 a 60 cm). Estos sistemas permiten el tratamiento de agua de forma continua y se logra durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de las plantas emergentes. Por otra parte, los sistemas SFS proporcionan un tratamiento secundario, y consisten en canales o zanjas exclavados y rellenos de material granular, generalmente grava, en donde el nivel del agua se mantiene debajo de la superficie de la grava.

Los sistemas SFS tienen la ventaja de tener un área menor debido a que el lecho de grava aumenta la degradación biológica. Además, al estar el flujo de agua por debajo del

lecho de grava se evitan problemas de vectores que pueden presentarse en los sistemas FWS en algunos lugares. La temperatura es otro factor a considerar, ya que el lecho de grava sirve como capa de aislamiento para el agua, lo cual puede ser útil para mantener la temperatura constante en climas fríos.

Los humedales pueden tratar en forma efectiva altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno (eficiencias mayores al 80%), así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a que el agua residual no es puesta en contacto directamente con el suelo. (Lara, 1999:3)

Las plantas emergentes utilizadas en los humedales permiten la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Los tallos, raíces y rizomas permiten la penetración del oxígeno a la tierra o medio de apoyo, lo cual ocurriría naturalmente a través de la difusión. Éstas contribuyen al tratamiento del agua residual en varias maneras: estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo, dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten la sedimentación de materiales suspendidos, toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta, 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 y el escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas oxigena otros espacios dentro del sustrato. (Lara, 1999:3)

H. Biofiltración sobre lecho orgánico

Es una tecnología que elimina una amplia gama de compuestos contaminantes desde una corriente de fluido, ya sea gases o líquidos, mediante procesos biológicos. Inicialmente fue utilizada para el tratamiento de gases y olores, en donde se ponen en contacto los contaminantes del aire con un medio líquido a través de una columna humedecida sobre lecho orgánico. Actualmente se utiliza también para el tratamiento de agua residual con una alta carga orgánica y nitrogenada.

El agua residual es introducida a un biofiltro por la parte superior, fluyendo hacia la parte inferior, siendo filtrada mientras desciende. La velocidad de filtración es bastante

baja (menor a 0.5 m/día) y cuando el agua residual pasa por lecho orgánico los contaminantes son retenidos en éste por los mecanismos de transferencia de masa de absorción y adsorción, y posteriormente son degradados por los microorganismos que viven en el biofiltro. (Garzón-Zúñiga *et al*, 2008)

El lecho orgánico dentro del biofiltro brinda una alta área superficial y los nutrientes necesarios para formar una biopelícula de microorganismos, en donde ocurre la transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa. Una vez los microorganismos están adheridos al lecho, inician la degradación de la materia orgánica. Las características del material que conforma el lecho son importantes debido a que determinan el tiempo de operación, la actividad biológica de los microorganismos y los costos de operación del biofiltro.

El material filtrante es regenerado debido a que los microorganismos degradan los contaminantes retenidos en el filtro. Esto se logra estableciendo un equilibrio entre la tasa de deposición de contaminantes y el crecimiento de poblaciones de microorganismos. Es por esto que esta tecnología emplea caudales bajos y tiempos de retención hidráulica altos. Se trata, por lo tanto, de un biofiltro percolador en el cual se lleva a cabo una infiltración muy lenta sobre material orgánica muy adsorbente que permite establecer un equilibrio entre la carga de contaminantes y el crecimiento de diferentes poblaciones de microorganismos dentro del biofiltro (Garzón-Zúñiga, 2004)

En Canadá, turba y piezas de madera de coníferos fueron utilizadas como lecho orgánico (Buelna y Belanger, 1990) y en Bélgica, utilizaron piezas usadas de madera, cortezas y turba. (Lens *et al*, 1994). La eficiencia de remoción de contaminantes en ambos casos fue muy buena; para materia orgánica se obtuvo una remoción mayor al 90% de DQO y mayor de 99% de DBO₅, para los sólidos suspendidos totales (SST) fue mayor de 95%, para el total de nitrógeno Kjeldahl fue de 80% y para coliformes fecales mayor de 99%.

Esta tecnología está siendo utilizada a escala real en Canadá y Estados Unidos para el tratamiento de agua residual doméstica debido a que presenta varias ventajas: costos de

construcción competitivos, bajos costos de operación, no requieren un personal altamente calificado para su operación y requieren bajo mantenimiento.

En México se realizó un estudio sobre la eficiencia de remoción de contaminantes para aguas residuales municipales utilizando materiales endémicos como lecho orgánico. En este país predomina el clima tropical, diferencia de los estudios realizados en Canadá y Bélgica, donde predomina el clima templado, lo cual afecta las temperaturas de operación del biofiltro, y por lo tanto, su eficiencia de remoción de contaminantes. En un experimento, donde la carga de contaminantes del afluente era mayor a los estudios de Canadá y Bélgica, se determinó que, con los materiales filtrantes utilizados y la temperatura ambiente de la región, se obtiene una eficiencia de remoción de contaminantes mayor a la reportada previamente: $\leq 98.7\%$ de DBO_5 , $\leq 84\%$ de DQO, $< 99.99\%$ de coliformes fecales, $< 99.99\%$ de coliformes totales y $< 96.93\%$ de huevos de helminto. El biofiltro fue operado por 400 días, con una carga hidráulica de 0.3 m^3 de agua residual/ m^3 material filtrante·día⁻¹ a un flujo de 0.68 m^3 de aire/ m^2 material filtrante·día⁻¹. (Garzón-Zúñiga *et al*, 2008)

III. ANTECEDENTES

A. Situación del recurso hídrico en Guatemala

Para el año 2006, existió disponibilidad de agua debido a que al hacer el balance hídrico, existió un excedente. En el Cuadro 3 se encuentra un resumen de la situación del recurso hídrico en Guatemala. Sin embargo, la relación de agua disponible y utilizada es afectada enormemente por los niveles de contaminación y las necesidades que existen para su uso. Es por esto que para el año 2025 se espera que la demanda de agua supere a la oferta y, por lo tanto, exista un déficit hídrico.

Cuadro 3: Uso del agua en el año 2006 y uso potencial del agua en el año 2025 en Guatemala.

Uso del agua	Uso año 2006 (millones de m ³)	Uso potencial año 2025 (millones de m ³)
Oferta hídrica bruta (incluye agua superficial y subterránea)	84,991	84,991
Caudal ecológico	21,248	21,248
Agua contaminada por descargas	33,996	33,996
Oferta hídrica neta	29,747	29,747
Agua potable	284	1,211
Riego	2,200	10,200
Industria	850	3,625
Energía	2,883	15,000
Usos totales	6,217	30,036
Excedente hídrico	23,530	(289)

(URL e IIA, 2006:37)

El balance hídrico nacional, para el año 2000, indicaba que el 84% del recurso hídrico en el territorio guatemalteco era neto disponible y el restante 16% fue utilizado en los siguientes rubros: 7% para uso doméstico, 6% para riego, 2% para la industria y 1% para hidroeléctricas. (URL e IIA, 2006:36)

El incremento en la demanda de agua potable es cada vez más difícil de satisfacer, lo cual genera sobreexplotación. En el caso de la ciudad de Guatemala, existe un déficit de 1 m³/s y para el municipio de Guatemala éste es de 2 a 2.5 m³/s con respecto a la demanda de agua potable. (URL e IIA, 2005:21)

B. Contaminación del agua en Guatemala

El área metropolitana genera anualmente 140,000,000 m³ de aguas residuales. El caudal de agua residual generado era de 1.07 m³/s a principios de los años 1970; en el 2001 era de 3.2 m³/s.

De los 223 centros urbanos con más de dos mil habitantes, sólo 24 aplican algún tipo de tratamiento al agua residual que generan; el resto lo descarga directamente a los ríos.

Un estudio realizado en 1999 reportó que el 30% de los cursos de agua analizados a nivel nacional posee una concentración de 37 productos químicos utilizados en la agricultura que supera los límites que permiten las normas internacionales. La Autoridad del Manejo Sustentable del Lago de Amatitlán (AMSA) ha reportado más de 80 industrias que contaminan los ríos que descargan en dicho lago. La mayor contaminación industrial a nivel nacional se encuentra concentrada en los ríos Villalobos-María Linda, Samalá y el Motagua, principalmente.

El costo de tratamiento de aguas negras es de aproximadamente \$0.75/m³, lo que implicaría un aumento de cinco veces la tarifa que se cobra por agua potable en la ciudad de Guatemala, para un sistema que se pague por sí mismo y que trate adecuadamente el agua negra que genera.

Las municipalidades se han dado cuenta del problema, pero hacen falta recursos. El problema se enfoca principalmente en el vínculo que existe entre la salud humana y el

agua potable. En el año 2000 las enfermedades diarreicas agudas fueron la segunda causa de mortalidad y la segunda de morbilidad entre los guatemaltecos, superada únicamente por las infecciones respiratorias. El 43% de la mortalidad infantil tuvo como causa la diarrea, con un promedio de cinco niños fallecidos diariamente. (URL e IIA, 2006:37)

C. Legislación

El artículo 127 de la Constitución Política de la República de Guatemala establece que el agua es un bien público, inalienable e imprescriptible y que su aprovechamiento, uso y goce se otorgan en función del interés social. Además, señala que una ley específica regulará el tema. Sin embargo, dicha ley todavía no existe, lo cual provoca que no exista una entidad designada como responsable para el manejo integrado de los recursos hídricos. Una consecuencia de esto es la cantidad elevada de normas y reglamentos que generan varios ministerios para administrar el recurso. (URL e IIA, 2006:39)

El ordenamiento jurídico vigente asigna al agua diversos valores: ambiental, debido a que se considera un factor abiótico; económico, ya que forma parte del Estado y de los particulares; y social, por lo que establece la Constitución en el artículo 127. (URL e IIA, 2005:9)

Además, con respecto a la calidad del agua el Decreto Legislativo 68-86 del Congreso de la República estableció la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente. En el artículo 15 se establecieron lineamientos específicos que deben ser incorporados a los Reglamentos y otras disposiciones emitidos por la máxima autoridad ambiental, que hoy en día es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Entre uno de los lineamientos se encuentra la implementación del Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, publicado en el Acuerdo Gubernativo 431-2007, modificado por el Acuerdo Gubernativo 33-2008. Con respecto a las normas relativas al manejo de desechos sólidos y líquidos, inició el funcionamiento del Manual de Indicadores Ambientales, además de la promulgación del Reglamento de las Descargas y Reúso de las Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, publicado en

el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual estableció los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de aguas residuales y control de lodos, a través de un mejoramiento de las características de ambas en un proceso continuo. (Aguilar, 2009:77)

IV. JUSTIFICACIÓN

Actualmente existe un excedente hídrico en Guatemala, lo cual implica que la oferta hídrica neta es mayor a la demanda. Sin embargo, según el Perfil Ambiental de Guatemala, realizado por la Universidad Rafael Landívar y el Instituto de Incidencia Ambiental en el año 2006, se calcula que para el año 2025 la oferta hídrica neta sea superada por la demanda. Una variable que reduce la disponibilidad del agua es su contaminación. La contaminación del agua es un problema presente en todo el país. Se cuentan registradas 49 plantas de tratamiento para aguas servidas, de las cuales 6 están fuera de servicio, sólo 15 operan actualmente y el resto funcionan parcial o inadecuadamente. Veintitrés de esas plantas, aproximadamente el 50%, se encuentran en el área metropolitana.

La biofiltración sobre lecho orgánico ha demostrado, desde inicios de la década de 1990, ser una alternativa competitiva en costos de instalación, operación y mantenimiento para el tratamiento secundario de agua residual doméstica con respecto a los métodos convencionales para el tratamiento secundario de agua residual para pequeñas comunidades.

La eficiencia de remoción de contaminantes en esta tecnología depende de las condiciones de operación del biofiltro, tales como la temperatura a la cual se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica y el lecho orgánico seleccionado. Al momento de realizar este trabajo de graduación no existían investigaciones publicadas en Guatemala relacionadas con el uso de la tecnología de biofiltración para el tratamiento secundario de agua residual y su eficiencia de remoción de contaminantes utilizando trozos de ramas de ficus. Por lo que, al analizar la eficiencia de un biofiltro que opera con un material filtrante que esté disponible en Guatemala, con las condiciones climatológicas y características del agua residual doméstica generada en el país se podrá establecer si dicha tecnología es técnica y económicamente viable para la remoción de contaminantes del agua residual con estas características.

Además, los sistemas de tratamiento naturales de agua residual tienen una eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo mayor en comparación con los sistemas convencionales. Por lo cual su uso sería adecuado para tratar agua residual con una alta carga de estos contaminantes, y así evitar la eutrofización de ríos y lagos, como ha ocurrido con los lagos de Amatitlán y de Atilán.

V. OBJETIVOS

A. Objetivo general

1. Diseñar e instalar un sistema de fosa séptica para el tratamiento primario y biofiltro con lecho orgánico (trozos de *ficus*) para el tratamiento secundario de agua residual doméstica a escala laboratorio generada en el Edificio de los Colegios Profesionales para evaluar su eficiencia en la remoción de contaminantes.

B. Objetivos específicos

1. Seleccionar y dimensionar el equipo adecuado para la construcción de un biofiltro que permita remover en un 60% la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno total (NT), así como alcanzar una reducción del 50% de los coliformes fecales (CF) y del 25% del fósforo total (PT) en el agua residual tratada.

2. Evaluar la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) de una planta de tratamiento de agua residual a la cual están integrados la fosa séptica y el biofiltro.

3. Determinar si el ficus es un material filtrante adecuado como lecho orgánico para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en el biofiltro diseñado.

4. Establecer el costo de construcción de una planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales, a escala laboratorio, ubicada en el Edificio de los Colegios Profesionales.

VI. PROBLEMA A RESOLVER

La mayor parte de las tecnologías disponibles actualmente en Guatemala para el tratamiento secundario de agua residual implican un alto costo energético y de mano de obra, debido a que su instalación requiere de personal calificado así como de una alta inversión inicial y altos costos de operación y mantenimiento, lo cual evita que comunidades con escasos recursos económicos traten adecuadamente sus aguas residuales.

Desde la década de 1990, el Centro de Investigación Industrial de Quebec (CRIQ, por sus siglas en francés), ubicado en Canadá ha investigado y desarrollado la tecnología de biofiltración sobre lecho orgánico para el tratamiento de aguas residuales con un bajo costo y, obteniéndose buenos resultados. Posteriormente se ha investigado más acerca del tema en otros países y centros de investigación, como por ejemplo el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en donde se han obtenido resultados satisfactorios para el tratamiento de aguas residuales de todo tipo con esta tecnología.

Sin embargo, no existen investigaciones publicadas en Guatemala acerca de la eficiencia de remoción de contaminantes de un biofiltro utilizando ficus como material filtrante y para su operación en las condiciones climatológicas del país, las cuales afectan su eficiencia de remoción de contaminantes.

VII. METODOLOGÍA

A. Diseño del biofiltro

1. Se determinó el caudal del afluente que puede soportar el biofiltro para alcanzar los niveles de remoción de contaminantes deseados a partir de valores teóricos de la demanda biológica de oxígeno (DBO), y sólidos suspendidos totales (SST) en aguas residuales domésticas no tratadas y de experimentaciones previas que determinan la carga máxima de DBO y SST que puede soportar un biofiltro con lecho orgánico como material filtrante realizadas por el Dr. Marco Garzón-Zúniga, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

2. Se eligió una bomba de aire y bomba dosificadora con capacidad para manejar el caudal que puede soportar el biofiltro tanto de aire como de agua a tratar.

3. Se eligieron los materiales que sirven para soportar la estructura del biofiltro dentro de la planta así como tuberías y accesorios que sirven para conectar las bombas, tanto de entradas como salidas de agua al biofiltro.

4. Debido a restricciones presupuestarias, posteriormente se tomó una muestra del agua residual del afluente de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales, analizando la demanda biológica de oxígeno (DBO), y sólidos suspendidos totales (SST) y se modificó el caudal del afluente del biofiltro que pueda soportar la carga de contaminantes que ingresa.

B. Caracterización de material filtrante

1. Se realizó el corte de las ramas de ficus, las cuales fueron donadas por una empresa del sector alimenticio. El largo aproximado de las ramas cortadas fue de un metro.

2. Las ramas fueron trituradas utilizando una trituradora de residuos orgánicos marca TRAPP ®, modelo TR200.

3. Se colocaron las ramas trituradas al sol por aproximadamente 8 horas para disminuir su humedad y permitir una mejor conservación del material filtrante.

4. Se colocó una malla con una apertura de 0.127 m (½ pulgada), por la cual se hicieron pasar las ramas trituradas; esto fue necesario para remover las ramas con un diámetro de partícula mayor a 10 centímetros o las que se habían aglomerado debido a la humedad.

5. Manualmente se clasificaron los trozos de ficus triturados según su largo, ancho y alto y se separaron a.

6. Con un vernier, se midió el largo, ancho y alto de 100 ramas de ficus trituradas, seleccionadas previamente para formar parte del material filtrante, para determinar el tamaño de partícula promedio del empaque del biofiltro.

C. Instalación del biofiltro

1. Se realizó un trabajo de soldadura para armar la estructura metálica que soportará al biofiltro.

2. Se colocaron las tuberías y accesorios que conectan el biofiltro con el agua residual a tratar, así como con un humedal de flujo subterráneo conectado en serie dentro del mismo sistema de tratamiento de agua residual.

D. Medición de porosidad de material filtrante

1. Se llenó una probeta con 1000 mL de piedrín, que posteriormente sirvió como empaque del biofiltro.

2. Con otra probeta de 1000 mL se añadió agua al piedrín de la primera probeta hasta alcanzar la marca de 1000 mL, que incluyó tanto el agua que ocupó los espacios vacíos entre el piedrín como el mismo piedrín.

3. El volumen de agua consumido en la segunda probeta indicó cuál fue el volumen de estos espacios vacíos en el lecho.

E. Operación y mantenimiento del biofiltro

1. Se permitió el ingreso del agua residual a tratar al biofiltro.
2. Durante la puesta en marcha y en la posterior operación del biofiltro se realizaron inspecciones para verificar que no existan problemas en la operación del biofiltro dentro de la planta y se toman las acciones correctivas pertinentes (cambio en condiciones de operación, bloqueo temporal del afluente al biofiltro, etc.) cuando éstos existieron.

F. Monitoreo y evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes

1. Se tomaron muestras de agua residual en cuatro tomas de muestra diferentes: a la entrada del biofiltro, a la salida del biofiltro, entre los dos humedales y a la salida del segundo humedal.
2. Se analizó la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). La frecuencia de la toma de ambas muestras fue semanal. El procedimiento detallado para los análisis de agua residual se encuentra en el Apéndice H, página 81.
3. A partir de los análisis realizados para determinar la calidad del agua que entra y sale del biofiltro se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes y, de ser necesario, se cambiaron las condiciones de operación del biofiltro.

VIII. RESULTADOS

Figura 1: Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales

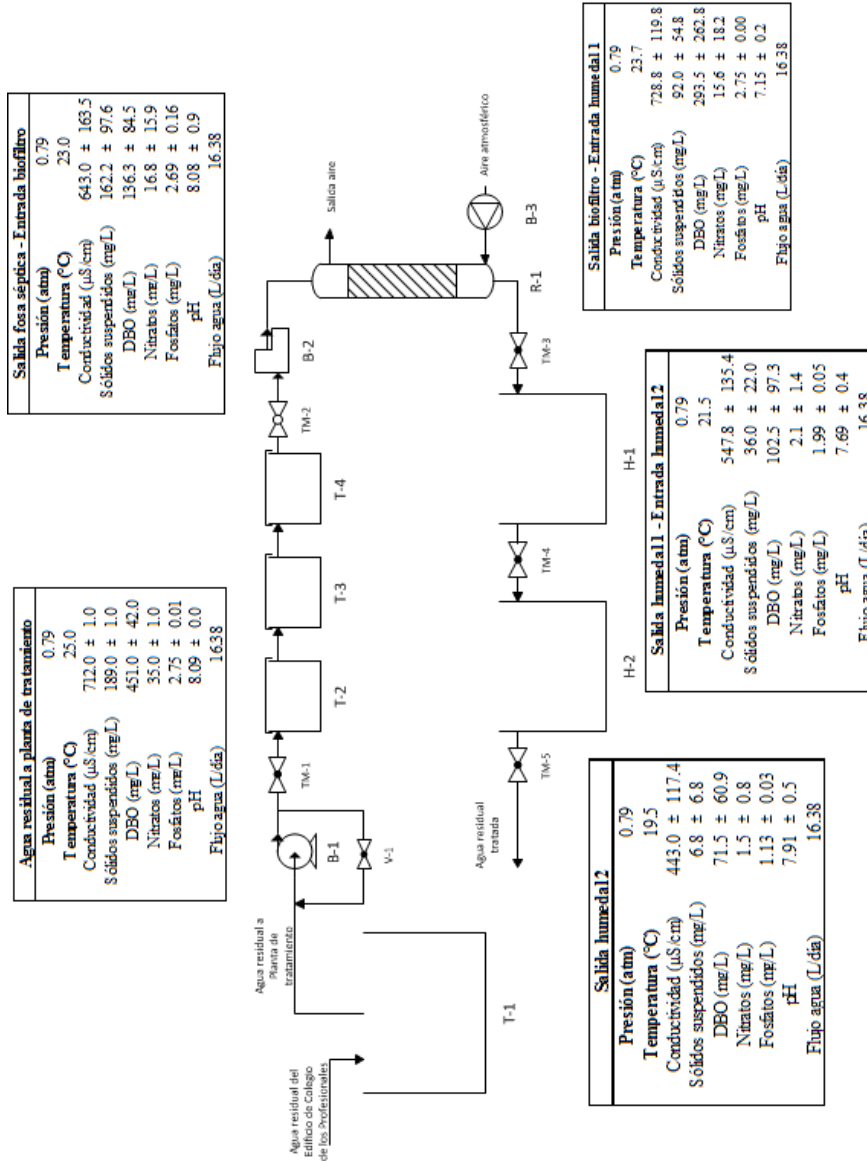
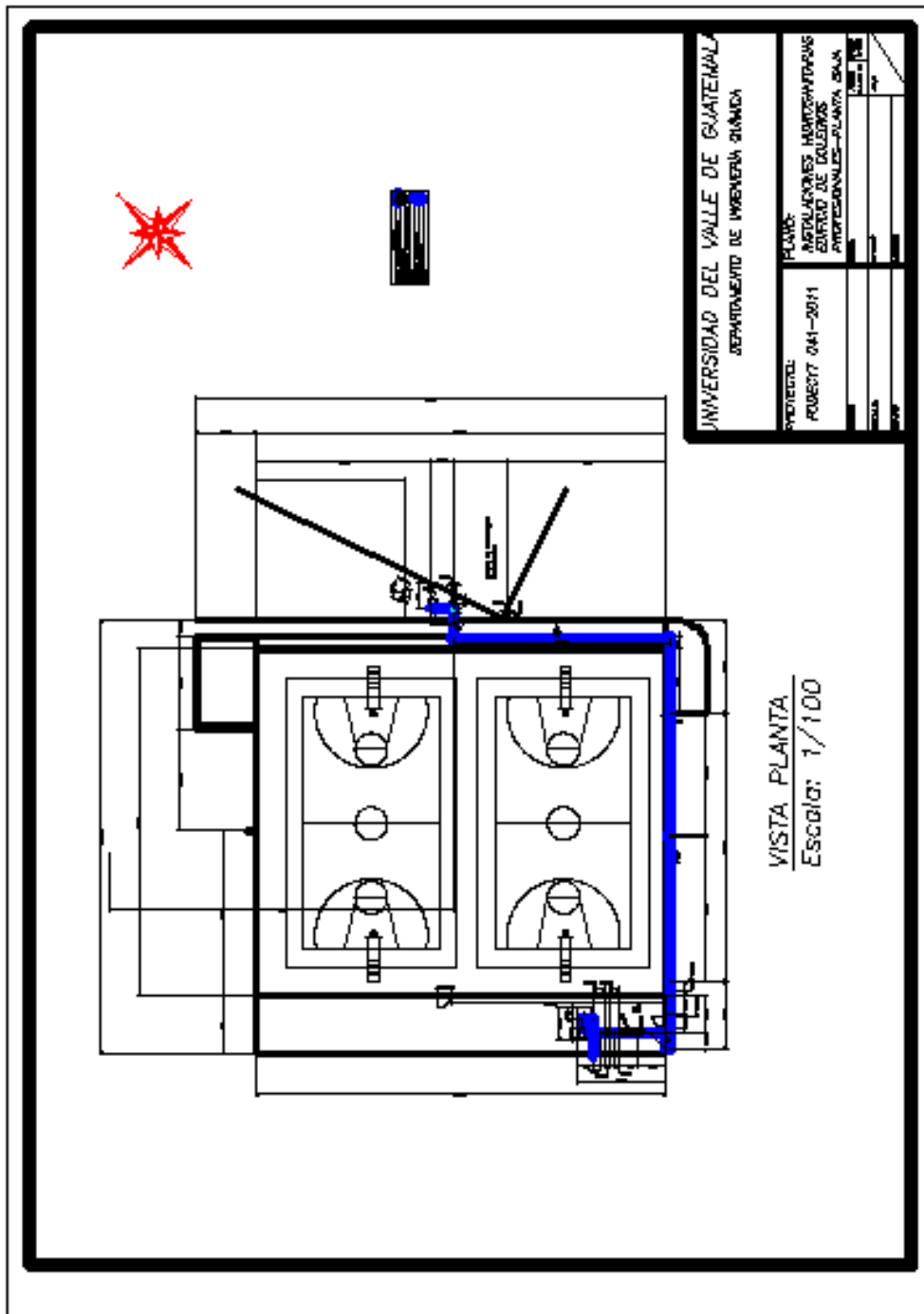


Figura 2: Plano de vista de planta de sistema de tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio



Cuadro 4: Caudal máximo de agua residual a tratar en el biofiltro a partir del parámetro limitante y caudal experimental

Tipo de operación	Caudal máximo teórico (L/día)	Caudal experimental (L/día)
Con aireación	4.79	----
Sin aireación	3.35	16.38

Cuadro 5: Eficiencia de remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales con base en diferentes parámetros.

Parámetro	% Eficiencia
Sólidos suspendidos totales	96.40 ± 96.88
Demanda bioquímica de oxígeno	84.15 ± 72.12
Nitrógeno, en forma de NO_3^-	95.69 ± 51.59
Fósforo, en forma de PO_4^{3-}	59.05 ± 1.70

Cuadro 6: Eficiencia de remoción de contaminantes del biofiltro con lecho orgánico residuales con sistemas naturales con base en diferentes parámetros.

Parámetro	% Eficiencia
Sólidos suspendidos totales	43.28 ± 25.77
Demanda bioquímica de oxígeno	-115.28 ± 103.22
Nitrógeno, en forma de NO_3^-	7.15 ± 8.35
Fósforo, en forma de PO_4^{3-}	-2.08 ± 0.12

Cuadro 7: Variación de pH y conductividad eléctrica en relación al afluente y efluente del biofiltro y de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

Parámetro	% Variación	
	Biofiltro	Planta de tratamiento
pH	-21.28 ± 0.73	-2.25% ± 0.14
Conductividad	13.34 ± 2.19	-37.78 ± 10.01

Ilustración 3: Comportamiento en el tiempo de la concentración de sólidos suspendidos en diferentes puntos de la planta de tratamiento.

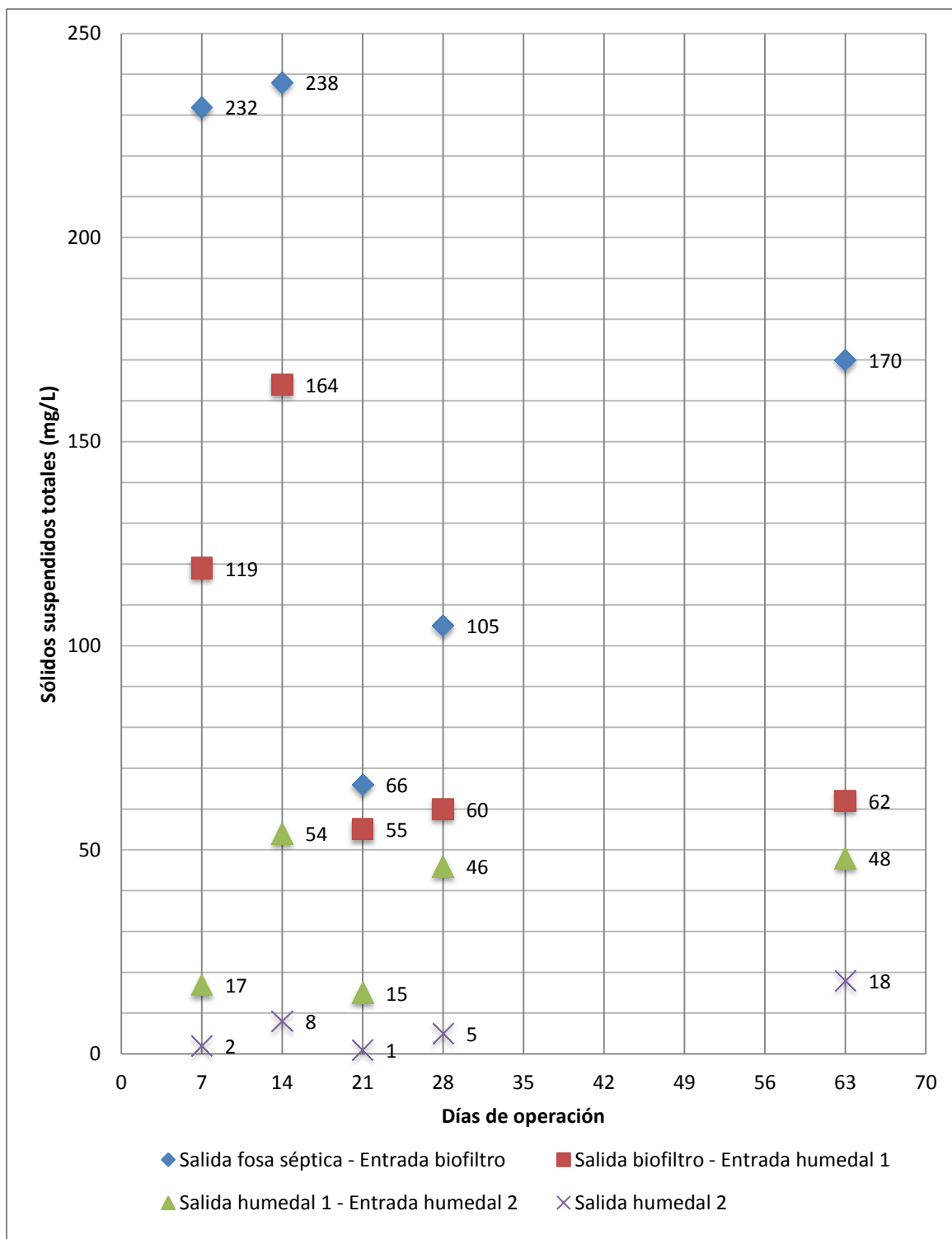


Ilustración 4: Comportamiento en el tiempo de la demanda bioquímica de oxígeno en diferentes puntos de la planta de tratamiento.

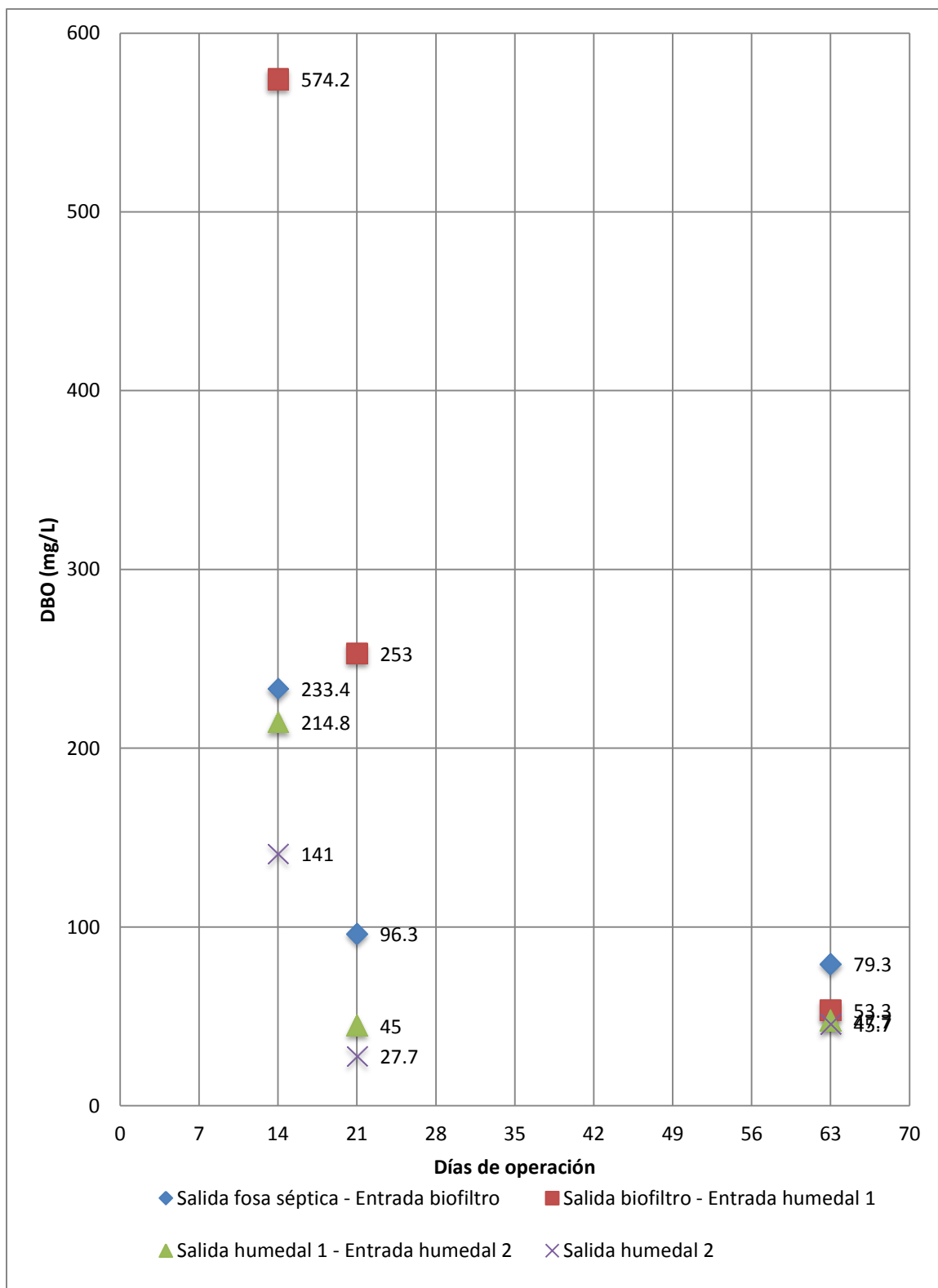


Ilustración 5: Comportamiento en el tiempo de la conductividad eléctrica en diferentes puntos de la planta de tratamiento.

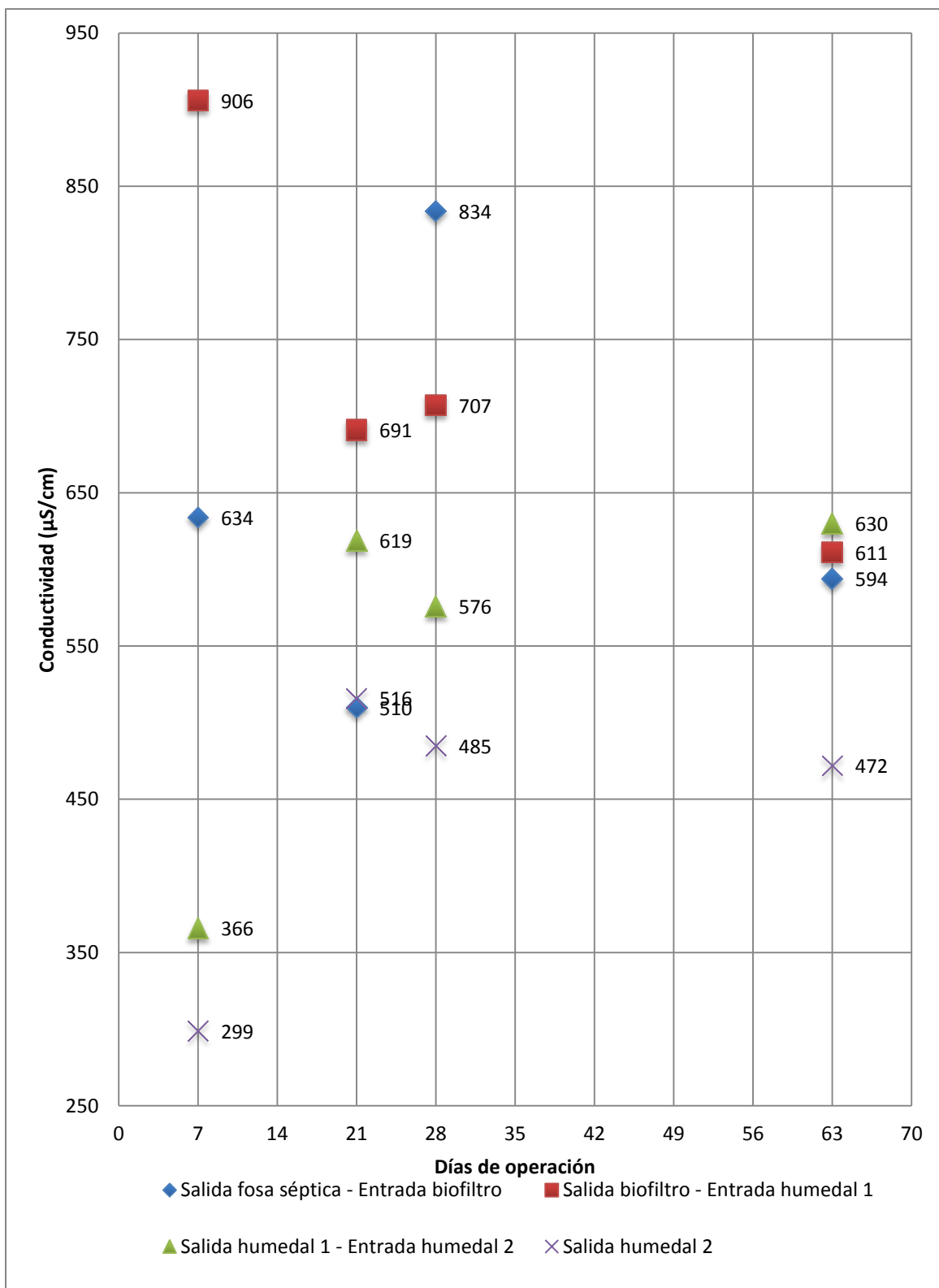


Ilustración 6: Comportamiento en el tiempo del pH en diferentes puntos de la planta de tratamiento.

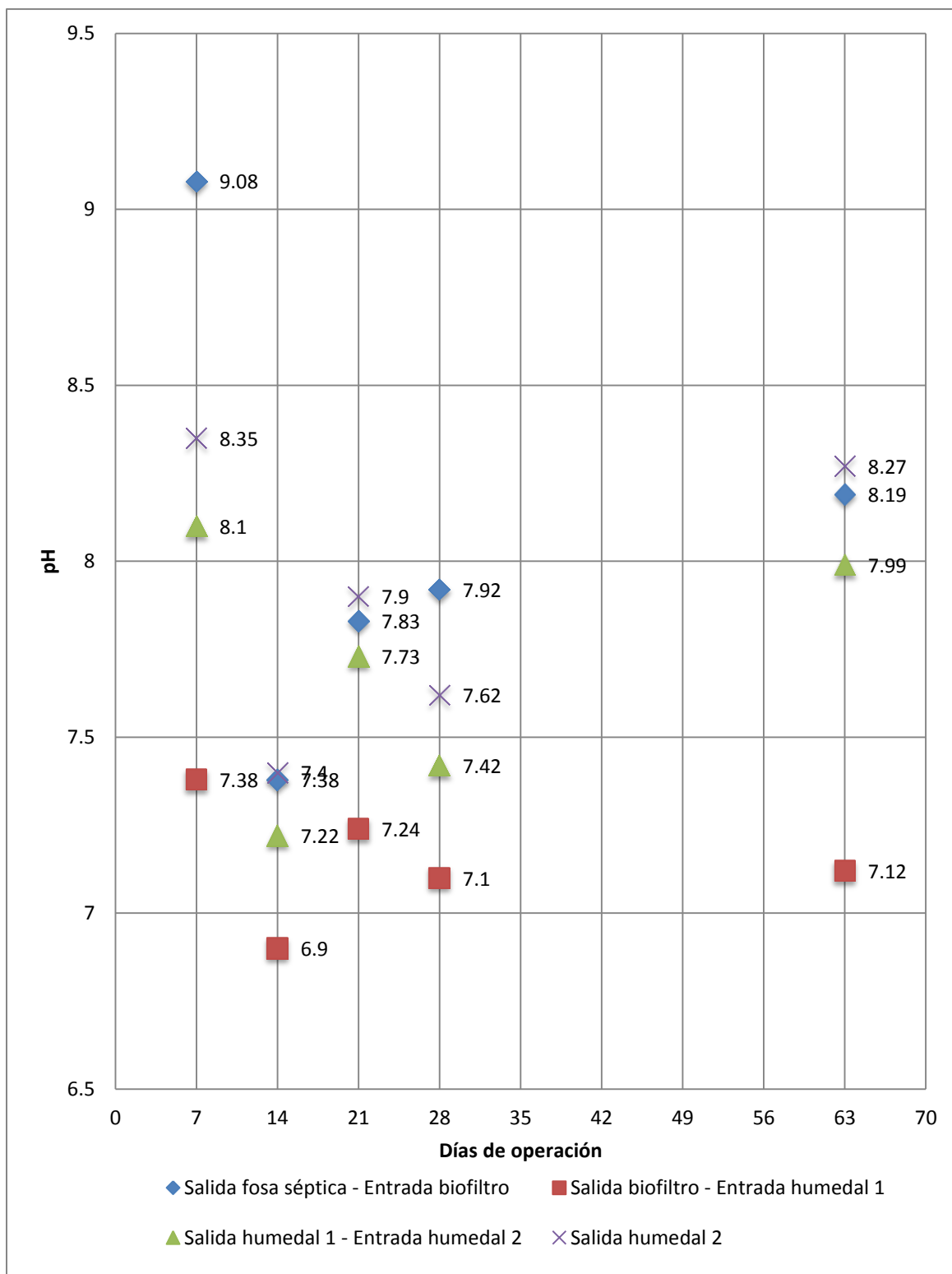


Ilustración 7: Comportamiento en el tiempo de la concentración de nitrógeno en forma de NO_3^- en diferentes puntos de la planta de tratamiento.

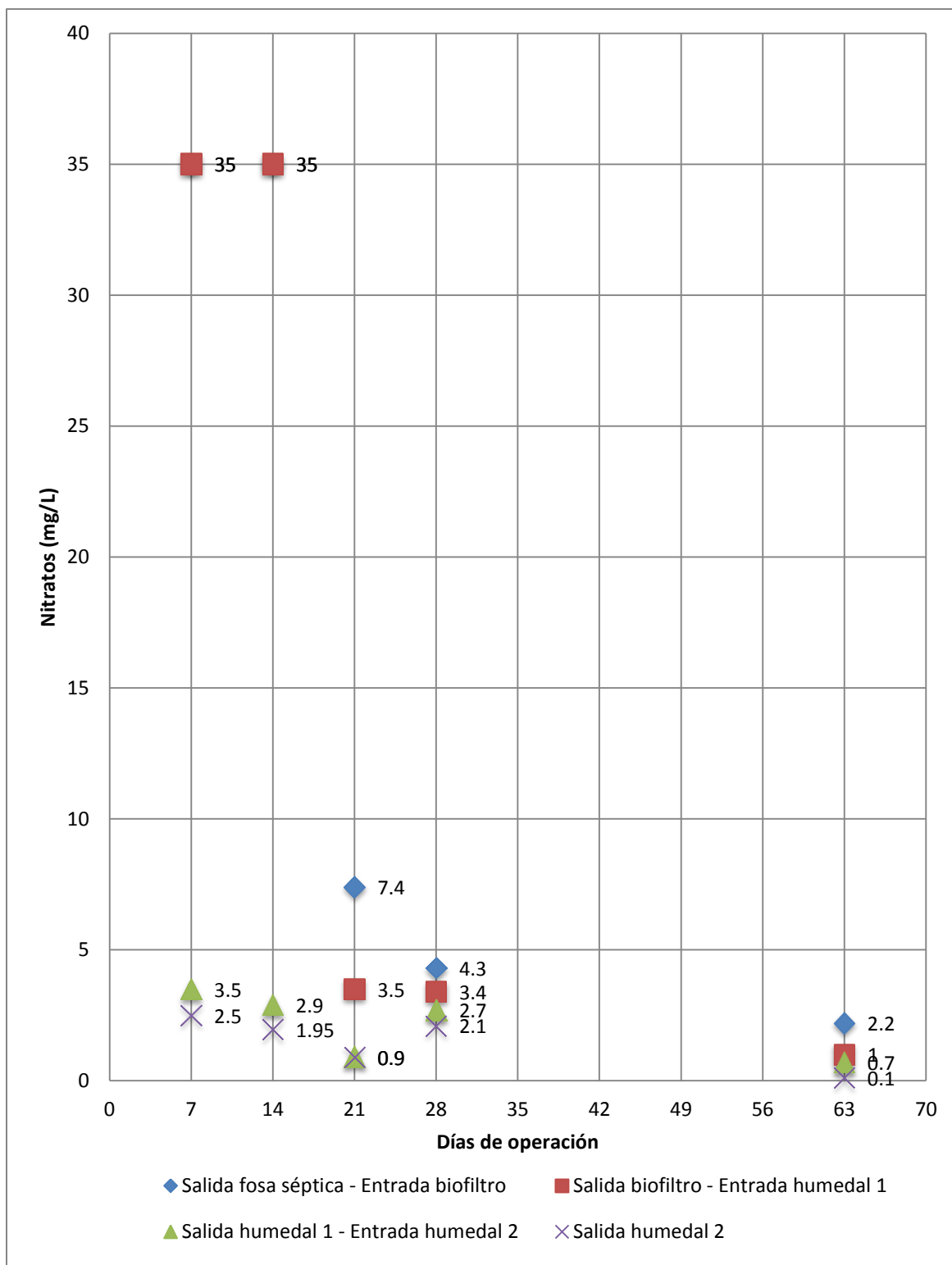
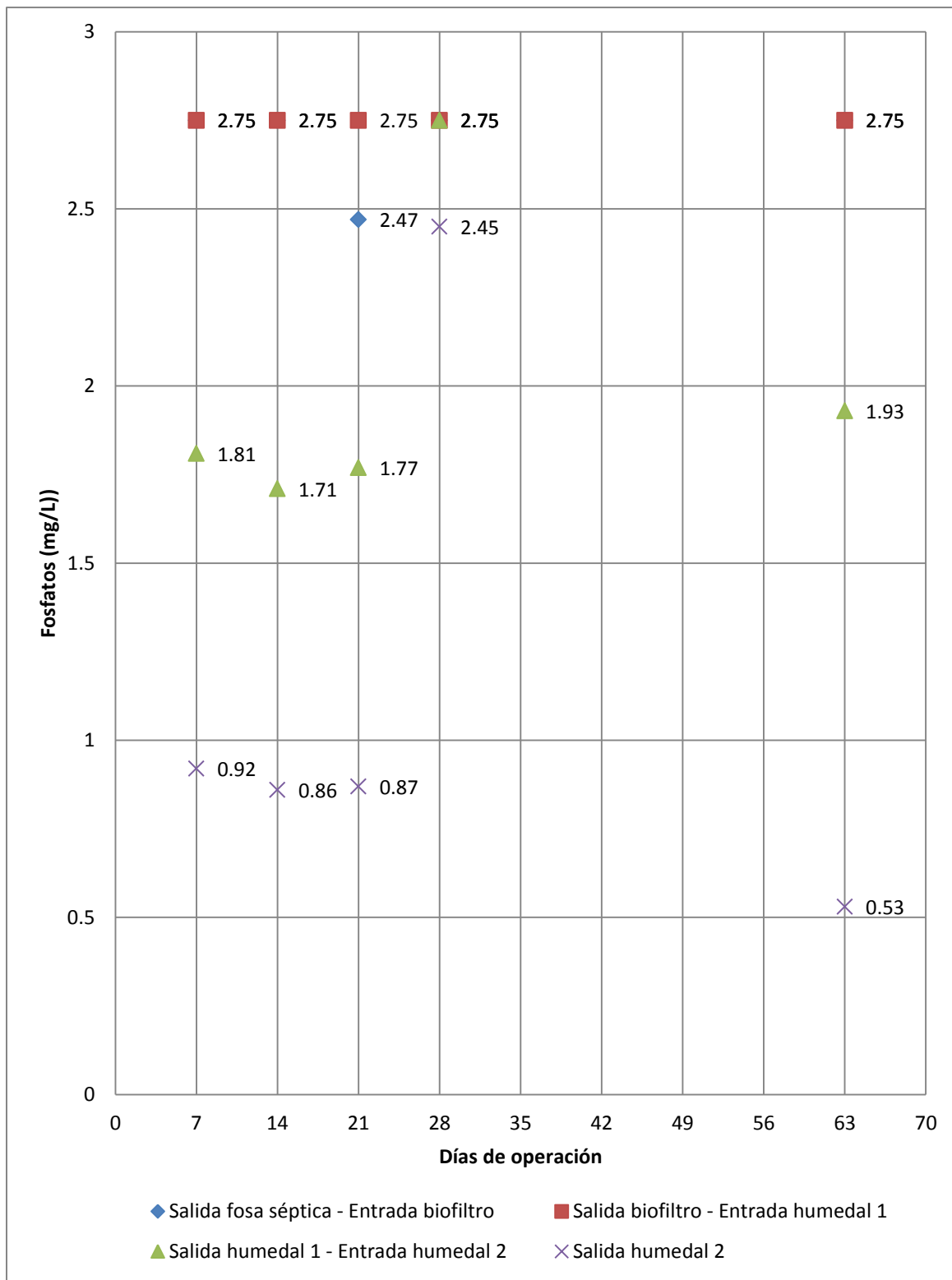


Ilustración 8: Comportamiento en el tiempo de la concentración de fósforo en forma de PO_4^{3-} en diferentes puntos de la planta de tratamiento.



Cuadro 8: Costo de construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

Rubro	Costo (Q.)
Mano de obra	Q6,018.85
Bombas	Q7,721.42
Materiales de plástico	Q3,808.64
Materiales eléctricos	Q6,137.99
Materiales de construcción	Q3,390.95
Otros (válvulas, accesorios, etc.)	Q2,725.30
TOTAL	Q29,803.15

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo de graduación se diseñó un biofiltro con lecho orgánico como material filtrante a partir de datos experimentales obtenidos en investigaciones realizadas por el Dr. Marco Garzón-Zúñiga, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para las cargas máximas, en kg/m^2 día, que pueden soportar los biofiltros con este tipo de empaque tanto para la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) como para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del afluente.

Debido a que las dimensiones del biofiltro ya estaban establecidas anteriormente, se realizó el diseño para obtener el caudal máximo de agua residual a tratar, en base a las dimensiones de un tubo de polimetilmetacrilato (acrílico) adquirido, el cual tiene un diámetro interno de 5 pulgadas y un largo de 1.84 metros. Los cálculos mencionados anteriormente toman en cuenta únicamente el área transversal del tubo. El largo del tubo depende de la cantidad de coliformes fecales que se desee remover, en donde por medio de resultados experimentales, se ha demostrado que un largo de 2 metros permite una remoción mayor al 50% de coliformes fecales. En el caso de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales construida, debido a que se cuenta con otra tecnología para el tratamiento secundario de agua residual, no se requiere una eficiencia de remoción de coliformes muy alta y se acepta que el largo del tubo sea menor a 2 metros.

El cálculo del caudal máximo está basado en los valores para SST y DBO que ingresan al sistema; en este caso, en base a los del agua residual que ingresa a la fosa séptica. Debido a problemas para la obtención de recursos financieros que permitieran realizar los análisis de agua residual del efluente, el diseño se realizó inicialmente en base a parámetros de agua residual típicos para aguas residuales domiciliarias, tomando 260 mg/L de DBO y 250 mg/L de SST y una remoción del 25% del DBO y 30% de SST en la fosa séptica. Posteriormente se realizaron los análisis del agua residual y se obtuvo un DBO al inicio del sistema de 451 ± 1 mg/L y SST de 189 ± 1 mg/L. Es importante mencionar que la muestra analizada es simple, es decir, únicamente corresponde al agua

residual que ingresa en un tiempo específico a la planta y, por lo tanto, no representa adecuadamente el comportamiento del agua residual a lo largo de la operación de todo el sistema ya que existen múltiples factores que afectan la calidad del agua residual a tratar, tales como la hora a la cual se toma la muestra, las actividades realizadas al momento de la toma de muestra, la temperatura de la muestra, el suministro continuo de agua residual, entre otras. En este caso, se sugiere tomar una muestra compuesta, que a diferencia de la anterior, corresponde a una combinación de muestras individuales que son tomadas en intervalos definidos de tiempo que representan de mejor manera los parámetros del afluente.

Después de tomar en cuenta los resultados del análisis de agua residual que ingresa al sistema, el caudal máximo de agua residual a tratar en el biofiltro es de 4.79 L/día para una operación con aireación y de 3.35 L/día para una operación sin aireación. En este trabajo se decidió operar el biofiltro en el primer mes sin aireación y con un caudal mayor al de diseño debido a que las cargas máximas corresponden a cuando el biofiltro está a punto de saturarse, lo cual depende de la cantidad máxima de sólidos retenidos por el lecho orgánico y al tamaño máximo de la biopelícula que puede llegarse a formar, ya que si ésta es muy gruesa se desprende del lecho y sale del sistema, aumentando el DBO en el efluente. En el inicio de la operación, se esperaba que ninguna de las dos condiciones afectara la eficiencia de remoción de contaminantes.

Inicialmente la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales estaba planeada para ser construida en un terreno de la Universidad del Valle de Guatemala, campus central, cercano a los talleres de buses del Colegio Americano de Guatemala y teniendo como suministro el agua residual proveniente de los servicios sanitarios de los talleres. Sin embargo, al momento de analizar el montaje de la planta en dicho lugar se observó que el suministro de agua residual no era constante y, por lo tanto, no se podía asegurar una alimentación continua del sistema. Esto debido a que la Universidad deja de operar parcialmente en los meses de junio y diciembre, lo cual no permite la construcción de un tanque de equalización para asegurar un suministro continuo, ya que el tiempo de retención debería ser muy grande.

Debido a procedimientos administrativos, la compra de equipo, en especial la de la bomba centrífuga que sirve para alimentar de agua residual la planta de tratamiento y el cable eléctrico que sirve para alimentar con corriente eléctrica el sistema para el funcionamiento de bombas y el medidor de nivel, se realizó en base al terreno de la Universidad del Valle de Guatemala y, por lo tanto, ambos insumos fueron dimensionados para una operación en dicho terreno. La bomba centrífuga escogida fue de 0.5 hp y el calibre del cable para alimentar con corriente la planta es el #6 AWG.

Por los inconvenientes mencionados anteriormente se trasladó la ubicación de la planta al Edificio de los Colegios Profesionales, que se encuentra en la Ciudad de Guatemala, ya que en este lugar se podía asegurar un flujo continuo de agua residual a lo largo de todo el año. Una vez definida la ubicación se decidió cuál sería el tanque de alimentación de agua residual.

Es importante mencionar que la alimentación de agua residual debe estar libre de agua pluvial ya que ésta aumenta la variabilidad de las condiciones de operación de la planta, lo cual no permite una comparación del comportamiento de la planta en diferentes períodos de tiempo, tanto de época lluviosa como seca. Debido a que todos los posibles tanques de alimentación identificados contenían una mezcla de agua residual y pluvial, se decidió utilizar el primer tanque en donde todas las aguas negras provenientes de los servicios sanitarios del edificio son almacenadas. Fue necesario cancelar una caja de aguas pluviales contigua al tanque de alimentación.

Al contar con un suministro continuo de agua residual y que ésta no estuviera mezclada con aguas pluviales se procedió a realizar las conexiones a proceso, tanto del agua residual como de energía eléctrica para la bomba centrífuga que transportará el agua desde el tanque hasta la fosa séptica del sistema. Se construyó una caja de 90 centímetros de largo, por 60 centímetros de ancho, por 60 centímetros de profundidad para evitar que la bomba esté expuesta a las lluvias y se hizo una zanja de aproximadamente 15 cm de profundidad a lo largo de todo el tramo que conecta la caja de la bomba centrífuga con la primera fosa séptica. En dicha zanja se colocó tubería de PVC de 1.27 centímetros (0.5 pulgadas) y poliducto de 2.54 centímetros (1 pulgada). Además, se hizo otra zanja de la misma profundidad, únicamente con poliducto de 1 pulgada para alimentar con energía

eléctrica el medidor de nivel de agua residual en la fosa séptica y las bombas tanto dosificadora como de aire.

Una vez todas las conexiones a proceso fueron colocadas, se hizo una fundición de 60 centímetros de ancho, por 60 centímetros de alto, por 10 centímetros de profundidad, para anclar la estructura metálica que soporta el tubo de acrílico. Además, también se fundió una plancha para la fosa séptica y otra para los dos humedales de flujo subsuperficial y se anclaron todos los equipos para el tratamiento de agua residual a las fundiciones.

Para proteger las instalaciones eléctricas y la parte de control de la planta de tratamiento se construyó una caja metálica de hierro negro de 70 centímetros de largo, por 30 centímetros de alto, por 35 centímetros de profundidad.

Al tener todas las instalaciones físicas y eléctricas se procedió a llenar el tubo de acrílico con una capa de 15 centímetros de piedrín, 1.60 centímetros de ramas de ficus trituradas y 5 centímetros de viruta de madera. El piedrín retiene las ramas de ficus dentro del tubo y disminuye la cantidad de sólidos suspendidos que sale del biofiltro. Las ramas de ficus son el material orgánico filtrante y la viruta de madera permite una distribución uniforme del agua que ingresa al biofiltro.

En el arranque de la planta se utilizó agua potable para realizar la medición de la porosidad y tiempo de retención hidráulico del empaque y además permitió identificar posibles fugas en la operación del sistema. También se logró definir el caudal de alimentación de agua residual a la planta, el cual es de 16.38 L/día. Dicho caudal se mantiene en forma constante debido a la bomba dosificadora, la cual fue calibrada para operar a dicho caudal.

Debido a que al inicio de la operación no se conoce el comportamiento del sistema se definió la realización de análisis de laboratorio del agua residual con una frecuencia de una semana, la cual puede ser mayor en caso que se observe una variación en la remoción de contaminantes baja al comparar varios análisis.

Al realizar análisis semanales desde el día del arranque hasta el día 63 de operación de la planta se observa que el pH tiende a disminuir al pasar por el biofiltro, con un porcentaje de variación del -21.28 ± 0.73 % con respecto a la muestra inicial. El pH en el afluente de la planta es de 8.09 ± 0.01 y en el efluente de 7.91 ± 0.48 . En toda la planta, el porcentaje de variación de pH es de -2.25 ± 0.14 %, lo cual indica que en conjunto, el sistema no varía considerablemente la alcalinidad del agua. El rango adecuado de pH para la existencia de la mayoría de vida se encuentra en de 6 a 9, por lo que las condiciones en la planta, tanto por el pH del afluente como por las condiciones de operación de los equipos permiten la formación de microorganismos que ayuden a remover los contaminantes en forma natural. Es importante mencionar el aumento del pH conforme pasa por los humedales, lo cual se debe a que las plantas, al absorber nitratos, lo reducen a forma amoniacal antes de que forme parte en los compuesto orgánicos de la planta.

La conductividad eléctrica, en $\mu\text{S}/\text{cm}$, que es una medida indirecta de los sólidos disueltos totales en el agua, tuvo un porcentaje de variación de -37.78 ± 10.01 % en toda la planta y un porcentaje de variación de 13.34 ± 2.19 % al pasar por el biofiltro. El resultado de la variación global coincide con lo esperado, debido a que al pasar por el tratamiento secundario se espera que los sólidos disueltos en el agua disminuyan. El aumento de la conductividad al pasar por el biofiltro es un comportamiento atípico, pero es probable que se deba al uso de piedrín en el material filtrante. Este piedrín no estaba lavado previamente, por lo cual pudo desprender iones de metales que aumentaron el valor de la conductividad. En el día 28 se observa que la conductividad del efluente del biofiltro fue menor con respecto a la del afluente, por lo que es un posible indicador que el piedrín se ha lavado. En el día 63 la conductividad del efluente del biofiltro es mayor que la del afluente, pero el aumento no es considerablemente alto.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales, en mg/L , se tuvo una eficiencia de remoción global en la planta de 96.40 ± 96.88 %, la cual puede ser considerada como aceptable. En el biofiltro únicamente se obtuvo una remoción de 43.28 ± 25.77 %, la cual es baja comparada con el parámetro de diseño, en donde se esperaba remover un 60% de sólidos suspendidos totales. Esto pudo deberse a que el caudal de agua residual que

ingresa es muy alto, y que, incluso aunque el sistema no esté saturado, el material orgánico no soporta una carga de contaminantes tan alta.

Para la demanda bioquímica de oxígeno, se observa una remoción global del sistema del $84.15 \pm 72.12\%$ y un aumento del $115.28 \pm 103.22\%$ en el biofiltro. Tanto en la fosa séptica como en los humedales se obtiene el comportamiento esperado, ya que se logra una alta remoción en la fosa y en el primer humedal, siendo menor la remoción en el segundo humedal. Al igual que con los sólidos suspendidos totales, la remoción de DBO se puede explicar por la carga de contaminantes tan alta que está siendo alimentada y porque la biopelícula no ha logrado adherirse por completo a las paredes del material filtrante, por lo que, aunque se está generando biomasa, ésta se desprende y sale para el primer humedal. Para el día 63 se obtuvo una disminución del DBO de 32.79% entre el afluente y efluente del biofiltro, por primera vez desde que se empezó a monitorear la planta.

El proceso de nitrificación que se da en el sistema es complejo, pero puede ser explicado de acuerdo a las reacciones bioquímicas que convierten el nitrógeno orgánico en otros iones que pueden ser consumidos en forma más fácil por los microorganismos y las plantas. Debido a limitaciones presupuestales, únicamente fue posible realizar una medición del nitrógeno en forma de NO_3^- , expresada en mg/L, en el agua residual. El agua residual que no se ha degradado se espera que no contenga nitrógeno en forma de NO_3^- , ya que el nitrógeno que proviene del agua residual fresca debe contener únicamente nitrógeno de origen proteico y urea. Debido a que la medición de nitrógeno en forma de NO_3^- al inicio del sistema es mayor a 35 mg/L se toma como un indicador de que el agua ya se ha degradado cuando llega a la primera fosa séptica del sistema. En el biofiltro no se observó una disminución apreciable de la concentración de nitrógeno en forma de NO_3^- en las primeras dos mediciones, probablemente debido a que la biopelícula todavía no se había adherido al material filtrante y por lo tanto las bacterias no realizaron la desnitrificación. En el caso del día 21 se observa una remoción del 52.70% de los nitrógeno en forma de NO_3^- en el biofiltro, lo cual es un posible indicador de que la biopelícula ya se adhirió adecuadamente al material filtrante y que la desnitrificación se está llevando a cabo. La eficiencia global del sistema en cuanto a la

remoción de nitrógeno en forma de NO_3^- es de $95.69 \pm 51.59\%$, la cual se considera como muy buena.

Por último se realizó la medición de fósforo reactivo, en mg/L de ortofosfatos, PO_4^{3-} , para evaluar la eficiencia de remoción de fósforo en la planta. Los elementos carbono-nitrógeno-fósforo se degradan en una proporción de 100:5:1 tomando como base una parte fósforo. Por lo tanto, la degradación esperada en el sistema es mucho menor para el fósforo. La remoción de fósforo, expresada en mg/L de PO_4^{3-} fue de $59.05 \pm 1.70\%$, la cual se considera buena, pero debido a que el sistema tiene poco tiempo de estar funcionando es posible que las plantas absorban mucho fósforo y conforme avance el tiempo de operación, dicha eficiencia disminuya. En el biofiltro prácticamente no se observa un cambio en la concentración de fósforo en forma de PO_4^{3-} .

También es importante mencionar que existieron varios problemas durante la operación de la planta de tratamiento con sistemas naturales que pudieron perjudicar en la eficiencia de remoción de contaminantes. El principal problema fue la regulación de los flujos de entrada y de salida de agua residual del biofiltro, debido a que no se contó con una válvula adecuada que permitiera regular el flujo a la salida, ya que el de entrada dependía de la calibración de la bomba dosificadora. Una diferencia entre ambos caudales hace que el biofiltro se inunde o se vacíe, lo cual afecta el desarrollo de los microorganismos que degradan la materia orgánica y puede hacer que éstos se desprendan del material filtrante orgánico.

X. CONCLUSIONES

1. Se diseñó un biofiltro sobre lecho orgánico, trozos de ficus, con un diámetro interno de 0.127 metros (5 pulgadas) y un largo de 1.84 metros y se instaló en el Edificio de los Colegios Profesionales para el tratamiento de agua residual doméstica a escala laboratorio, diseñado para soportar un caudal máximo de agua residual de 0.00479 m³/día (4.79 L/día) para una operación con aireación y de 0.00335 m³/día (3.35 L/día) para una operación sin aireación de acuerdo a las concentraciones del afluente de la planta en sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno.
2. El biofiltro con ficus como material filtrante orgánico tuvo una eficiencia de 43.28 ± 25.77% para la remoción de sólidos suspendidos totales, 7.15 ± 8.35% para el nitrógeno en forma de nitratos, un aumento de 150.89 ± 82.86% de la demanda bioquímica de oxígeno y un aumento de 2.08 ± 0.12% para el fósforo en forma de fosfato, a un flujo aproximado de 0.016 m³/día (16 L/día).
3. La eficiencia de remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales fue de 96.40 ± 96.88% para la remoción de sólidos suspendidos totales, 68.74 ± 9.06% para la demanda bioquímica de oxígeno, 95.69 ± 51.59% para el nitrógeno en forma de nitratos y de 59.05 ± 1.70% para el fósforo en forma de fosfatos, a un flujo aproximado de 0.016 m³/día (16 L/día).
4. En los primeros 63 días de operación de la planta de tratamiento el ficus no cumplió con la eficiencia de remoción de contaminantes esperada como material filtrante orgánico en el biofiltro, lo cual se debió a que el caudal que ingresa a la planta es muy alto comparado con el de diseño, lo cual fue así por dificultades presentadas con la regulación del flujo que ingresa al biofiltro y provocó el biofiltro no soportara una carga de contaminantes tan alta.

5. La planta de tratamiento construida en el Edificio de los Colegios Profesionales tiene un costo de Q29,803.15 siendo el rubro con mayor costo el de bombas, con un total de Q7,721.42.

XI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda disminuir el caudal de diseño para el afluente de agua residual del biofiltro hasta aproximadamente $0.05 \text{ m}^3/\text{día}$ ($5 \text{ L}/\text{día}$) para permitir que la carga de contaminantes sea menor y así evaluar si aumenta la eficiencia de remoción tanto de sólidos suspendidos totales como de la demanda bioquímica de oxígeno del biofiltro.
2. Airear el biofiltro debido a que en dicha operación se puede aumentar en un 42.86% el caudal de agua residual a tratar en el sistema con respecto a la operación sin aireación con la misma área superficial de material filtrante orgánico.
3. Debido a las dificultades prácticas observadas para la regulación del caudal de ingreso de agua residual al sistema se recomienda utilizar un tubo para el biofiltro con un diámetro mayor, lo cual, aunque aumenta su costo de construcción, permite el tratamiento de un mayor caudal de agua residual, teniendo únicamente como restricción el caudal máximo de la bomba dosificadora, el cual es de 0.9 litros por hora.
4. Medir la compactación del ficus en el biofiltro, la cual determina si el material filtrante se degrada en un período de tiempo adecuado, debido a que en investigaciones previamente realizadas para determinarla ha sido aproximadamente de dos años y en este trabajo de graduación únicamente se operó la planta por 63 días.
5. Obtener una muestra compuesta del afluente de la planta de tratamiento con sistemas naturales, en intervalos de 1 hora, de 8:00 am a 5:00 pm, en un día hábil y en un día inhábil, debido a que la eficiencia de remoción de contaminantes se basa en una muestra simple y la calidad del agua residual que ingresa varía dependiendo de la hora y del día que fueron generadas.

6. Realizar un estudio de prefactibilidad y factibilidad económica para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales con un caudal de diseño que permita tratar toda el agua residual generada en el Edificio de los Colegios Profesionales una vez concluya el tiempo de operación de la planta a escala laboratorio ubicada en el mismo lugar.

7. Divulgar los resultados de la eficiencia de remoción de contaminantes de la planta de tratamiento con sistemas naturales en revistas científicas nacionales o en cualquier otro medio de comunicación masivo debido a que es una solución técnica y económicamente viable para evitar la eutrofización de ríos y lagos en Guatemala.

XII. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, G y, A. Iza. 2009. *Gobernanza del agua en mesoamérica: Dimensión ambiental*. Suiza, UICN, Gland. 256 págs.
2. Buelna, G. y G. Belanger. 1990. *Biofiltration à base de tourbe pour le traitement des eaux usées des petites municipalités*. *Sci. Tech. Eau*. [Canadá]. 23 (1): 259-254.
3. Buelna, G.; N. Turgeon y R. Dubé. 2008. *Pig manure treatment by organic bed biofiltration*. *Desalination*. 231 (2008): 297-304
4. Buelna, G; M. Garzón-Zúñiga y G. Moeller-Chávez. 2011. *Los biofiltros de empaque orgánico: una alternativa simple, robusta y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales*. [México]. *Ide@s CONCYTEG*. 6 (71): 541-552.
5. Camacho, A., M. Gilles, et al. 2009. *Método para la determinación de bacterias coliformes, coliformes fecales y Escherichia coli por la técnica de diluciones en tubo múltiples (Número más probable o NMP)*. [En línea]. México, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP_6529.pdf> [Consulta: 28 de mayo de 2012]
6. Davis, M. 2010. *Waste and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. Nueva York, McGraw-Hill. 1296 págs.

7. García, J. y A. Corzo. 2008. *Depuración con humedales construidos: Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. España, Universidad Politécnica de Cataluña. 98 págs.
8. Garzón-Zúñiga, M. 2002. *Tratamiento de aguas residuales de granja de puerco por biofiltración aireada sobre cama de turba*. En *Memorias del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cancún, México, 27 al 31 de octubre de 2002.
9. Garzón-Zúñiga, M. 2003. *Determination of the hydraulic residence time in a trickling biofilter filled with organic material*. *Environmental Technology*, 23 (1): 605-614.
10. Garzón-Zúñiga, M. 2004. *La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial*. En *Memorias del XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*. San Juan, Puerto Rico.
11. Garzón-Zúñiga, M. 2005. *Nitrogen elimination mechanisms in an organic media aerated biofilter treating pig manure*. *Environmental Technology*, Vol. 26, pp 361-371.
12. Garzón-Zúñiga, M. 2007. *Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials*. *Water Science & Technology* Vol. 55 No 10, pp 135-143.
13. Garzón-Zúñiga, M.; Tomasini-Ortiz, A. et al. 2008. *Enhanced pathogen removal in on-site biofiltration systems over organic filtration materials*. *Water Practice & Technology* Vol. 3 No 2.

14. Lara, J. 1999. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Cataluña, Instituto Catalán de Tecnología. 122 págs.
15. Lens, P.; Vochten, P. *et al.* 1994. *Direct treatment of domestic wastewater by percolation over peat, bark and woodchips*. *Water Res.*, 28 (1): 17-26.
16. Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4a. ed. New York, McGraw-Hill. 1819 págs.
17. Perry, R. y D. Green. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a. ed. Estados Unidos, McGraw-Hill. 25 volúmenes.
18. Universidad Rafael Landívar e Instituto de Incidencia Ambiental. 2006. *Síntesis del perfil ambiental de Guatemala: Documento técnico del perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala. 30 págs.
19. Universidad Rafael Landívar e Instituto de Incidencia Ambiental. 2005. *Situación del recurso hídrico en Guatemala: Documento técnico del perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala. 30 págs.

XIII. APÉNDICE

A. Especificaciones de tanques, equipos y válvulas de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales

Cuadro 9: Especificaciones de tanques de almacenamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales

Tanque	Código	Descripción
Tanque de almacenamiento	T-1	<ul style="list-style-type: none">- Material: Cemento.- Dimensiones:<ul style="list-style-type: none">○ Base: 65 cm○ Altura: 65 cm○ Profundidad: 70 cm- Uso: Almacenamiento de agua residual antes de pasar a fosas sépticas.- Alimentación: continua.
Cubeta con tapadera 1	T-2	<ul style="list-style-type: none">- Material: Polipropileno.- Volumen total : 0.04 m³ (40 L)- Dimensiones:<ul style="list-style-type: none">○ Diámetro: 40 cm○ Altura: 65 cm- Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento.- Alimentación: por lotes.

(Continuación Cuadro 9)

Tanque	Código	Descripción
Cubeta con tapadera 2	T-2	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Polipropileno. - Volumen total : 0.04 m³ (40 L) - Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> ○ Diámetro: 40 cm ○ Altura: 65 cm - Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento. - Alimentación: por lotes.
Cubeta con tapadera 3	T-3	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Polipropileno. - Volumen total : 0.04 m³ (40 L) - Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> ○ Diámetro: 40 cm ○ Altura: 65 cm - Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento. - Alimentación: por lotes.

Cuadro 10: Especificaciones de bombas de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Equipo	Código	Descripción
Bomba centrífuga	B-1	Ver Apéndice K, Página 85.
Bomba dosificadora	B-2	Ver Apéndice K, Página 87.
Bomba de aire	B-3	Ver Apéndice K, Página 88.

Cuadro 11: Especificaciones de equipos para el tratamiento secundario del agua residual con sistemas naturales.

Equipo	Código	Descripción
<p>Biofiltro con lecho orgánico como material filtrante</p>	<p>R-1</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Material cilindro: Polimetilmetacrilato. - Dimensiones cilindro: <ul style="list-style-type: none"> o Diámetro: 12.7 cm (5 pulgadas) o Altura: 1.84 m - Dimensiones estructura metálica: <ul style="list-style-type: none"> o Base: 48.5 cm o Ancho: 48.5 cm o Altura: 2.05 m - Material de empaque: Ramas trituradas de ficus y piedrín. - Uso: Tratamiento secundario de agua residual. - Alimentación: continua.
<p>Humedal de flujo subsuperficial 1</p>	<p>H-1</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Polipropileno. - Volumen: 0.6 m³ (600 L) - Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> o Ancho: 1.15 m o Largo: 0.95 m o Altura: 0.80 m - Plantas: 3 cola de caballo y 1 cartucho blanco. - Uso: Tratamiento secundario de agua residual. - Alimentación: continua.

(Continuación Cuadro 11)

Equipo	Código	Descripción
Humedal de flujo subsuperficial 2	H-2	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Polipropileno. - Volumen: 0.6 m³ (600 L) - Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> o Ancho: 1.15 m o Largo: 0.95 m o Altura: 0.80 m - Plantas: 3 cola de caballo y 2 cartuchos blancos. - Uso: Tratamiento secundario de agua residual. - Alimentación: continua.

Cuadro 12: Descripción de válvulas utilizadas en la planta de tratamiento agua residual

Válvula	Código	Descripción
Válvula 1	V-1	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Globo. - Tamaño: ½ pulgada. - Material: PVC. - Uso: Regulación de recirculación de agua residual a la succión de la bomba centrífuga.
Toma de muestra 1	TM-1	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Válvula de globo. - Tamaño: ½ pulgada. - Material: PVC. - Uso: Regulación de flujo y toma de muestra del afluente de la planta.

(Continuación Cuadro 12)

Válvula	Código	Descripción
Toma de muestra 2	TM-2	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Manguera. - Tamaño: ¼ pulgada. - Uso: Toma de muestra y transporte de agua residual que ingresa al biofiltro.
Toma de muestra 3	TM-3	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Bola. - Tamaño: ½ pulgada. - Material: PVC - Uso: Regulación de flujo de entrada y toma de muestra de agua residual que ingresa al humedal 1.
Toma de muestra 4	TM-4	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Globo. - Tamaño: ½ pulgada. - Material: PVC. - Uso: Regulación de flujo de entrada y toma de muestra de agua residual que ingresa al humedal 2.
Toma de muestra 5	TM-5	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo: Globo. - Tamaño: ½ pulgada. - Material: PVC. - Uso: Regulación de flujo y toma de muestra de agua residual del efluente de la planta.

B. Diseño de fosa séptica

El tiempo de residencia mínimo recomendado para una fosa séptica es de 24 horas, con un promedio entre 1 y 3 días. En este caso se diseñó una fosa séptica que tuviera el máximo tiempo de residencia recomendado. Además, se diseñó con base al máximo caudal de agua residual a tratar cuando el sistema esté limpio, que es de 20 L/día.

El volumen del tanque se calcula con la siguiente ecuación:

$$q = \frac{V}{\bar{t}}$$

Ecuación 2

En donde, q = caudal de entrada a la fosa séptica del agua residual

V = volumen de la fosa séptica

t = tiempo de residencia promedio del agua residual

Despejando la Ecuación 2 para el volumen:

$$V = q\bar{t} = \left(\frac{20 L}{día}\right) (3 días) = 60 L$$

Tomando un factor de sobredimensionamiento de 10%:

$$V = 60 L \times 1.10 = 66 L$$

C. Diseño del biofiltro con ficus como material filtrante.

1. Datos originales. Para el diseño del biofiltro se utilizaron como base las cargas máximas permitidas para el tratamiento de agua residual obtenidas experimentalmente por el Dr. Marco Garzón-Zúniga, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Cuadro 13: Cargas máximas permitidas para el tratamiento de agua residual en un biofiltro, determinadas experimentalmente por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Tipo de operación	DBO	SST
Con aireación	0.320 kg DBO/m ² día	0.05 kg SST/m ² día
Sin aireación	0.10 kg DBO/m ² día	0.035 kg SST/m ² día

2. Cálculos.

a. Cálculo del área transversal del biofiltro.

Se utiliza la ecuación del área de un círculo a partir de su diámetro.

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2$$

Ecuación 3

En donde, A = Área transversal del biofiltro.

D = diámetro interno del tubo de acrílico.

$$A = \frac{1}{4} \pi (5.00 \pm 0.05 \text{ pulg})^2 \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^2 = 0.0127 \pm 1.2668 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

b. Cálculo de la carga máxima permitida para el tratamiento de agua residual en el biofiltro. Se asume un porcentaje de remoción del 25% de DBO al pasar el agua residual por la fosa séptica. Además, se utiliza el resultado del análisis del DBO que ingresa al sistema (ver Cuadro 22, página 71). El cálculo para encontrar el DBO del afluente del biofiltro es:

$$DBO_{afluente} = 0.75(DBO_{inicial})$$

Ecuación 4

En donde, $DBO_{afluente}$ = DBO a la entrada del biofiltro.

$DBO_{inicial}$ = DBO a la entrada de la fosa séptica.

$$DBO_{afluente} = 0.75(451.00 \pm 42.03 \text{ mg/L}) = 338.25 \pm 31.52 \text{ mg/L}$$

A partir de los datos del Cuadro 13 se obtiene la carga máxima permitida para el sistema.

$$q = \frac{\left(0.320 \frac{\text{kg DBO}}{\text{m}^2 \text{ día}}\right) \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ mg DBO}}{1 \text{ kg DBO}}\right)}{\left(338.25 \pm 31.52 \frac{\text{mg DBO}}{\text{L}}\right)} = 946.05 \pm 88.16 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

Por otra parte, se asume un porcentaje de remoción del 30% de SST al pasar el agua residual por la fosa séptica. También se utiliza el resultado del análisis del SST que ingresa al sistema (ver Cuadro 22, página 71). El cálculo para encontrar la DBO del afluente del biofiltro es:

$$SST_{afluente} = 0.7(SST_{inicial})$$

Ecuación 5

En donde, $SST_{\text{afluente}} = SST$ a la entrada del biofiltro.

$SST_{\text{inicial}} = SST$ a la entrada de la fosa séptica.

$$SST_{\text{afluente}} = 0.7(189 \pm 1 \text{ mg/L}) = 132.3 \pm 0.7 \text{ mg/L}$$

A partir de los datos del Cuadro 13 se obtiene la carga máxima permitida para el sistema.

$$q = \frac{\left(0.05 \frac{\text{kg SST}}{\text{m}^2 \text{ día}}\right) \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ mg SST}}{1 \text{ kg SST}}\right)}{\left(132.3 \pm 0.7 \frac{\text{mg SST}}{\text{L}}\right)} = 377.93 \pm 2.00 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

c. Cálculo del caudal de agua residual máximo a tratar en el biofiltro.

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{q}$$

Ecuación 6

En donde, $A =$ Área transversal del biofiltro.

$Q =$ caudal de agua residual a tratar.

$q =$ carga máxima permitida, en $\text{L/m}^2 \text{ día}$.

Despejando la ecuación anterior para Q, con base a la carga máxima de DBO del afluente, sin aireación:

$$Q = Aq = (0.0127 \pm 1.2668 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \left(946.05 \pm 88.16 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right) \\ = 12.01 \pm 1.13 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

En base a la carga máxima de SST del afluente, con aireación:

$$Q = Aq = (0.0127 \pm 1.2668 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \left(377.93 \pm 2.00 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right) = 4.79 \pm 0.03 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

Al hacer una comparación entre ambos caudales, se escoge el limitante como parámetro de diseño. En este caso, para una operación con aireación, el caudal máximo de agua residual es de 4.79 ± 0.03 L/día.

De igual manera se calculó el caudal de agua residual máximo a tratar en el biofiltro en una operación sin aireación, variando las cargas máximas experimentales según el

Cuadro 13.

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 14: Caudal máximo de agua residual a tratar en el biofiltro, de acuerdo a las cargas de DBO y SST.

Tipo de operación	DBO	SST
Con aireación	12.01 L/día	4.79 L/día
Sin aireación	3.75 L/día	3.35 L/día

D. Caracterización del material filtrante

1. Datos originales

Cuadro 15: Largo, ancho y alto de una muestra aleatoria de 100 ramas de ficus trituradas.

Número	Largo (± 0.0025 cm)	Ancho (± 0.0025 cm)	Alto (± 0.0025 cm)	Número	Largo (± 0.0025 cm)	Ancho (± 0.0025 cm)	Alto (± 0.0025 cm)
1	4.0150	1.6050	0.8900	51	4.1850	1.1600	0.4600
2	3.7250	1.2550	0.4600	52	6.3750	1.2000	1.1300
3	3.8800	1.0000	0.7550	53	4.9650	1.5600	0.6500
4	6.1300	1.4850	0.7450	54	5.0000	0.8200	0.9900
5	4.1800	1.2600	1.1200	55	4.3400	1.1400	0.6650
6	4.2950	1.1350	0.6000	56	3.7900	1.2500	0.5000
7	5.4800	0.8700	0.6100	57	4.8300	1.3850	0.8450
8	3.1400	1.3850	0.5900	58	4.8950	0.9800	0.9850
9	4.8550	1.0450	0.8550	59	5.0000	1.4250	1.0850
10	3.6400	0.8800	0.4900	60	4.3350	1.3000	0.6850
11	4.7300	0.9500	0.6150	61	3.7750	1.2200	0.7600
12	5.6100	1.0250	0.4800	62	3.4800	0.7800	0.6200
13	3.1250	0.9100	0.7850	63	6.0300	1.0900	0.4150
14	3.8950	0.9150	0.4550	64	3.6000	0.9200	0.6300
15	4.2900	1.3500	0.6200	65	2.7300	1.2200	0.7650
16	4.8300	0.9200	0.5450	66	5.8400	0.9350	0.8900
17	4.2850	0.9550	0.6150	67	3.5350	1.4050	1.2200
18	4.1900	1.0250	0.6600	68	3.0700	1.2450	0.7200
19	2.9900	1.0000	1.1450	69	5.3200	0.7250	0.7900
20	3.2200	0.9650	0.5800	70	3.7250	0.7100	0.6050

(Continuación Cuadro 15)

Número	Largo (±0.0025 cm)	Ancho (±0.0025 cm)	Alto (±0.0025 cm)	Número	Largo (±0.0025 cm)	Ancho (±0.0025 cm)	Alto (±0.0025 cm)
21	3.3900	1.3850	0.8100	71	4.3700	1.0450	0.6200
22	5.1350	1.7100	0.5300	72	4.2100	1.2600	1.0700
23	4.9250	1.4400	0.5850	73	3.8000	1.0850	0.7300
24	4.3650	1.2250	0.9850	74	4.1150	1.3250	1.0700
25	4.0700	1.6600	1.0800	75	4.2600	0.7950	0.7150
26	5.0700	1.0250	0.5750	76	4.4500	1.3400	0.5350
27	4.5000	1.1200	0.9200	77	5.1050	1.2200	0.9150
28	5.4000	1.0500	0.7200	78	3.8500	1.2000	0.5200
29	4.9750	0.9250	0.6300	79	4.6750	1.1250	0.5650
30	3.5700	0.9000	0.7400	80	6.5400	1.0450	0.7350
31	4.4650	0.9850	0.9200	81	3.4900	0.9500	0.6250
32	3.9800	1.1600	0.6650	82	4.4900	0.9100	0.7100
33	5.0500	0.7500	0.5400	83	3.8450	0.9200	0.8650
34	4.1450	1.2450	0.7450	84	4.3400	1.1100	0.9500
35	3.7000	1.1500	0.8850	85	2.7200	1.0800	0.6850
36	2.9150	1.1750	0.7650	86	4.0600	0.8900	0.3750
37	3.6100	1.1800	0.7800	87	4.9300	1.0700	0.5550
38	4.9200	0.7550	0.3000	88	3.6200	0.9700	0.5500
39	4.4700	0.8200	0.6450	89	3.9350	0.8800	0.4650
40	4.5900	1.1650	0.9800	90	3.8400	0.7800	0.4800
41	4.1700	0.9400	0.7000	91	3.3350	1.4500	1.1450
42	5.2300	0.9900	0.7600	92	5.7100	0.9400	0.7900

(Continuación Cuadro 15)

Número	Largo (± 0.0025 cm)	Ancho (± 0.0025 cm)	Alto (± 0.0025 cm)	Número	Largo (± 0.0025 cm)	Ancho (± 0.0025 cm)	Alto (± 0.0025 cm)
43	5.7600	1.3650	0.7100	93	4.2350	1.1400	0.8000
44	2.5850	0.9000	0.9400	94	5.6850	1.0400	0.5650
45	3.6650	1.4800	0.9050	95	6.2450	1.2650	1.0900
46	3.9800	0.9500	0.4400	96	4.2250	1.0000	0.8500
47	6.1850	1.4250	0.5200	97	6.6850	0.8300	0.7600
48	5.1500	1.0150	0.6800	98	4.4000	0.7500	0.6100
49	4.9500	1.1250	0.7300	99	4.5800	1.8800	0.7700
50	4.8150	0.9300	0.6900	100	4.5500	1.1800	0.8200

2. Análisis estadístico. Se utilizó la función “Estadística descriptiva” del Análisis de datos de Microsoft Excel ® 2010.

Cuadro 16: Análisis estadístico del largo de la muestra de ramas de ficus trituradas.

Parámetro estadístico	Valor
Media	4.41 cm
Error típico	0.089 cm
Mediana	4.315 cm
Moda	3.725 cm
Desviación estándar	0.886 cm
Varianza de la muestra	0.786 cm ²
Curtosis	-0.0538
Coefficiente de asimetría	0.398

(Continuación Cuadro 16)

Parámetro estadístico	Valor
Rango	4.1 cm
Mínimo	2.585 cm
Máximo	6.685 cm
Suma	441.355 cm
Cuenta	100
Mayor (1)	6.685 cm
Menor(1)	2.585 cm
Nivel de confianza (95.0%)	0.176

Cuadro 17: Análisis estadístico del ancho de la muestra de ramas de ficus trituradas.

Parámetro estadístico	Valor
Media	1.108 cm
Error típico	0.0234 cm
Mediana	1.075 cm
Moda	1 cm
Desviación estándar	0.234 cm
Varianza de la muestra	0.0549 cm ²
Curtosis	0.436
Coefficiente de asimetría	0.714
Rango	1.17 cm
Mínimo	0.71 cm
Máximo	1.88 cm
Suma	110.825 cm

(Continuación Cuadro 17)

Parámetro estadístico	Valor
Cuenta	100
Mayor (1)	1.88 cm
Menor(1)	0.71 cm
Nivel de confianza (95.0%)	0.0465

Cuadro 18: Análisis estadístico del alto de la muestra de ramas de ficus trituradas.

Media	0.728 cm
Error típico	0.0197 cm
Mediana	0.7125 cm
Moda	0.62 cm
Desviación estándar	0.197 cm
Varianza de la muestra	0.0386 cm ²
Curtosis	-0.289
Coefficiente de asimetría	0.452
Rango	0.92 cm
Mínimo	0.3 cm
Máximo	1.22 cm
Suma	72.835 cm
Cuenta	100
Mayor (1)	1.22 cm
Menor(1)	0.3 cm
Nivel de confianza (95.0%)	0.0390

Cuadro 19: Dimensiones promedio de las ramas trituradas de ficus.

Largo (cm)	4.41 ± 0.89
Ancho (cm)	1.11 ± 0.23
Alto (cm)	0.73 ± 0.20

Ilustración 9: Histograma de frecuencia porcentual para el largo de las ramas de ficus trituradas.

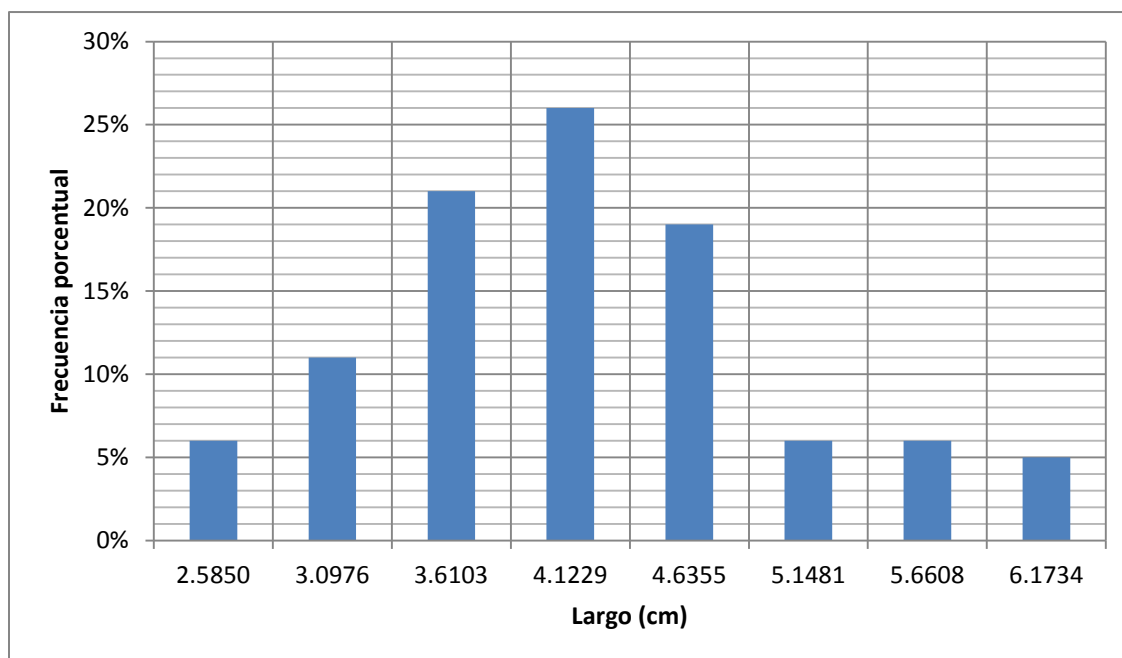


Ilustración 10: Histograma de frecuencia porcentual para el ancho de las ramas de ficus trituradas.

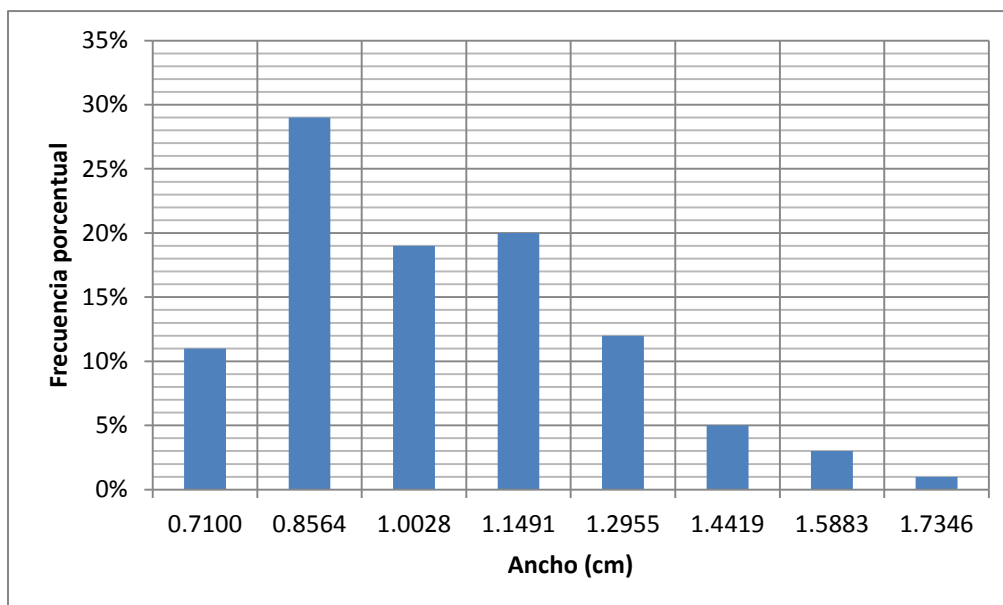
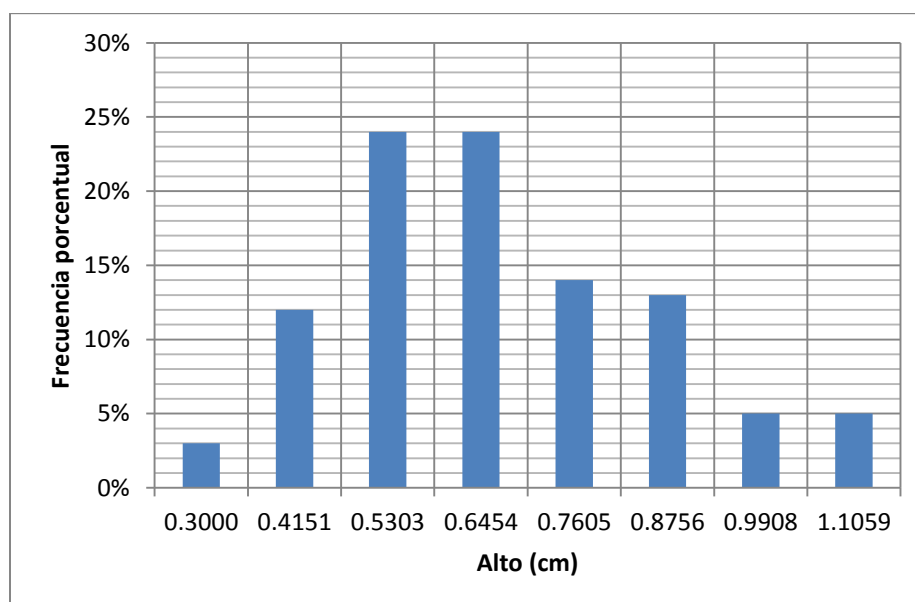


Ilustración 11: Histograma de frecuencia porcentual para el alto de las ramas de ficus trituradas.



E. Determinación de la porosidad del material filtrante.

1. Datos originales.

Cuadro 20: Volumen de espacios vacíos para un volumen de piedrín de 1000 mL.

Corrida	Volumen de espacios vacíos (± 10 mL)
1	520
2	520
3	500

2. Cálculos.

a. Porosidad del piedrín empleado en el biofiltro.

Se define la siguiente ecuación para la porosidad de un lecho fijo:

$$\varepsilon = \frac{V_o}{V} \times 100\%$$

Ecuación 7

En donde, ε = porosidad del lecho, en %.

V_o = volumen de espacios vacíos.

V = volumen total del lecho.

Sustituyendo valores para la primera corrida:

$$\varepsilon = \left(\frac{520 \pm 10 \text{ mL}}{1000 \pm 10 \text{ mL}} \right) (100\%) = 52.0 \pm 1.1 \%$$

De manera similar se calcularon las dos corridas siguientes.

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 21: Porosidad del piedrín.

Corrida	Porosidad del piedrín (± 1.1 %)
1	52.0
2	52.0
3	50.0

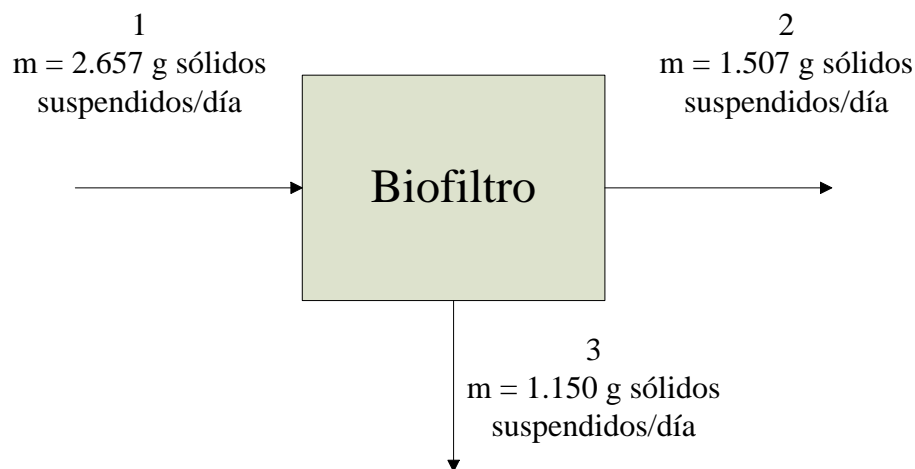
F. Balance de masa del biofiltro

La ecuación general para el balance de masa en el biofiltro es la siguiente:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

Ecuación 8

Ilustración 12: Diagrama de entradas y salidas del biofiltro.



A partir de la Ilustración anterior, se identifican las siguientes corrientes:

Corriente 1: flujo de agua residual que ingresa al biofiltro.

Corriente 2: flujo de agua residual que sale al biofiltro.

Corriente 3: flujo de agua y sólidos que son retenidos en el biofiltro.

Tomando como base que para la operación continua del biofiltro se requiere que el flujo volumétrico de entrada y de salida sea el mismo (de lo contrario, el biofiltro se inunda o se vacía) y que el flujo volumétrico que ingresó fue de 16.38 L/día, se calcularon los flujos máxicos de entrada, de salida y de acumulación.

Además, se toma como base un día, debido a que es la unidad de tiempo más conveniente por el bajo caudal que se maneja en general en la planta de tratamiento con sistemas naturales a escala laboratorio.

A la entrada del biofiltro:

$$(16.38 L) \left(\frac{162.2 \text{ mg}}{L} \right) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) = 2.657 \text{ g sólidos suspendidos}$$

A la salida del biofiltro:

$$(16.38 L) \left(\frac{92 \text{ mg}}{L} \right) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) = 1.507 \text{ g sólidos suspendidos}$$

A partir del diagrama de bloques se obtiene el balance de masa:

$$m_1 = m_2 + m_3$$

Ecuación 9

Por lo tanto el peso de los sólidos retenidos por el biofiltro, por cada litro de agua residual que ingresa, es igual a:

$$m_3 = m_1 - m_2 = 2.657 \text{ g} - 1.507 \text{ g} = 1.150 \text{ g sólidos retenidos}$$

G. Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes.

1. Datos originales.

Cuadro 22: Parámetros del afluente al inicio de la operación de la planta de tratamiento.

Parámetro	Resultado
pH	8.09 ± 0.01
Conductividad (µS/cm)	712 ± 1
Sólidos suspendidos totales, SST (mg/L)	189 ± 1
Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO (mg/L)	451.00 ± 42.03
Nitrógeno en forma de NO ₃ ⁻ (mg/L)	35 ± 1
Fósforo en forma de PO ₄ ³⁻ (mg/L)	2.75 ± 0.01
Coliformes totales (NMP/100 mL)	6.41E+08
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	5.72E+02

Cuadro 23: pH del agua residual tratada.

Punto de muestreo	pH (±0.01)				
	Día 7 (12/11/2012)	Día 14 (19/11/2012)	Día 21 (26/11/2012)	Día 28 (4/12/2012)	Día 63 (8/1/2013)
Toma de muestra 2	9.08	7.38	7.83	7.92	8.19
Toma de muestra 3	7.38	6.9	7.24	7.10	7.12
Toma de muestra 4	8.1	7.22	7.73	7.42	7.99
Toma de muestra 5	8.35	7.4	7.9	7.62	8.27

Cuadro 24: Conductividad eléctrica del agua residual tratada.

Punto de muestreo	Conductividad eléctrica ($\pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$)			
	Día 7 (12/11/2012)	Día 21 (26/11/2012)	Día 28 (4/12/2012)	Día 63 (8/1/2013)
Toma de muestra 2	634	510	834	594
Toma de muestra 3	906	691	707	611
Toma de muestra 4	366	619	576	630
Toma de muestra 5	299	516	485	472

Cuadro 25: Sólidos suspendidos totales en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Sólidos suspendidos totales ($\pm 1 \text{ mg}/\text{L}$)				
	Día 7 (12/11/2012)	Día 14 (19/11/2012)	Día 21 (26/11/2012)	Día 28 (4/12/2012)	Día 63 (8/1/2013)
Toma de muestra 2	232	238	66	105	170
Toma de muestra 3	119	164	55	60	62
Toma de muestra 4	17	54	15	46	48
Toma de muestra 5	2	8	1	5	18

Cuadro 26: Nitrógeno en forma de NO_3^- en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Nitrógeno en forma de NO_3^- (± 1 mg/L)				
	Día 7 (12/11/2012)	Día 14 (19/11/2012)	Día 21 (26/11/2012)	Día 28 (4/12/2012)	Día 63 (8/1/2013)
Toma de muestra 2	>35	>35	7.4	4.3	2.2
Toma de muestra 3	>35	>35	3.5	3.4	1
Toma de muestra 4	3.5	2.9	0.9	2.7	0.7
Toma de muestra 5	2.5	1.95	0.9	2.1	0.1

Cuadro 27: Fósforo en forma de PO_4^{3-} en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Fósforo en forma de PO_4^{3-} (± 1 mg/L)				
	Día 7 (12/11/2012)	Día 14 (19/11/2012)	Día 21 (26/11/2012)	Día 28 (4/12/2012)	Día 63 (8/1/2013)
Toma de muestra 2	>2.75	>2.75	2.47	>2.75	2.75
Toma de muestra 3	>2.75	>2.75	>2.75	>2.75	2.75
Toma de muestra 4	1.81	1.71	1.77	>2.75	1.93
Toma de muestra 5	0.92	0.86	0.87	2.45	0.53

2. Cálculos.

a. Parámetros promedio en el tiempo para cada punto de muestreo. Debido a que los cálculos son los mismos para los diferentes puntos, únicamente se muestra la determinación del promedio de los sólidos suspendidos para la entrada del biofiltro.

$$SST_{prom} = \frac{232 \text{ mg/L} + 238 \text{ mg/L} + 66 \text{ mg/L} + 105 \text{ mg/L} + 170 \text{ mg/L}}{5}$$

$$= 162.2 \text{ mg/L}$$

Este mismo cálculo se utiliza para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), conductividad, pH, nitrógeno en forma de NO_3^- y fósforo en forma de PO_4^{3-} .

b. Porcentaje de remoción de contaminantes. Para el cálculo de la remoción de sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno en forma de NO_3^- y fósforo en forma de PO_4^{3-} se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = 100\% - \frac{\text{Parámetro}_{\text{final}}}{\text{Parámetro}_{\text{inicial}}}$$

Ecuación 10

En donde, % Remoción = Porcentaje de remoción de contaminantes con respecto a resultados de análisis de agua residual en tomas de muestra consecutivas.

$\text{Parámetro}_{\text{inicial}}$ = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra del equipo anterior al que se desea analizar.

$\text{Parámetro}_{\text{final}}$ = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra a la salida del equipo a analizar.

Como ejemplo se hace el cálculo del porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales, en mg/L, entre el ingreso a la fosa séptica y la entrada al biofiltro. En este caso el parámetro inicial es el valor en la toma de muestra 2, ubicada a la entrada del biofiltro, y el parámetro final es el valor en la toma de muestra 3, ubicada a la salida del biofiltro.

$$\% \text{ Remoción} = 100\% - \frac{92.0 \text{ mg/L}}{162.2 \text{ mg/L}} = 43.28 \%$$

De igual manera se calculó la remoción de contaminantes para los sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno en forma de NO_3^- y fósforo en forma de PO_4^{3-} en el resto de tomas de muestra.

c. Porcentaje de variación de parámetros para evaluar la remoción de contaminantes. Para el cálculo de la variación en el pH y la conductividad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Variación} = \left(\frac{\text{Parámetro}_{final} - \text{Parámetro}_{inicial}}{\text{Parámetro}_{inicial}} \right) \times 100\%$$

Ecuación 11

En donde,

% Variación = Porcentaje de variación del parámetro con respecto a resultados de análisis de agua residual en tomas de muestra consecutivas.

Parámetro_{inicial} = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra del equipo anterior al que se desea analizar.

Parámetro_{final} = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra a la salida del equipo a analizar.

Como ejemplo se hace el cálculo del porcentaje de variación del pH entre el ingreso a la fosa séptica y la entrada al biofiltro.

$$\% \text{ Variación} = \left(\frac{8.08 - 8.09}{8.09} \right) \times 100\% = -0.12\%$$

De igual manera se calculó el porcentaje de variación de los parámetros de pH y conductividad demanda para el resto de tomas de muestra.

d. Eficiencia global de la planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales. Se define la eficiencia global de la planta de tratamiento de agua residual mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia} = 100\% - \frac{\text{Parámetro}_{TM-5}}{\text{Parámetro}_{TM-1}}$$

Ecuación 12

En donde, % Eficiencia = Porcentaje de la eficiencia de remoción de contaminantes con respecto a resultados de análisis de agua residual del afluente y efluente de la planta de tratamiento.

Parámetro_{TM-1} = Valor del parámetro en el afluente de la planta de tratamiento.

Parámetro_{TM-5} = Valor del parámetro en el efluente de la planta de tratamiento.

Como ejemplo se hace el cálculo de la eficiencia global del sistema, en base a los sólidos suspendidos totales, en mg/L. En este caso el parámetro inicial sería el de la toma de muestra 1, ubicada a la entrada de la fosa séptica, y el parámetro final sería el de la toma de muestra 5, ubicada a la salida del humedal 2.

$$\% \text{ Eficiencia} = 100\% - \frac{6.8 \text{ mg/L}}{189 \text{ mg/L}} = 96.40 \%$$

3. Datos calculados intermedios.

Cuadro 28: Sólidos suspendidos totales promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Sólidos suspendidos totales (mg/L)
Toma de muestra 2	162.2 ± 97.6
Toma de muestra 3	92.0 ± 54.8
Toma de muestra 4	36.0 ± 22.0
Toma de muestra 5	6.8 ± 6.8

Cuadro 29: Demanda bioquímica de oxígeno promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)
Toma de muestra 2	164.85 ± 96.9
Toma de muestra 3	413.6 ± 227.1
Toma de muestra 4	129.9 ± 120.1
Toma de muestra 5	84.35 ± 80.1

Cuadro 30: Concentración de nitrógeno en forma de NO_3^- promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Nitrógeno en forma de NO_3^- (mg/L)
Toma de muestra 2	16.8 ± 15.9
Toma de muestra 3	15.6 ± 18.2
Toma de muestra 4	2.1 ± 1.4
Toma de muestra 5	1.5 ± 0.8

Cuadro 31: Concentración de fósforo en forma de PO_4^{3-} promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Fósforo en forma de PO_4^{3-} (mg/L)
Toma de muestra 2	2.7 ± 0.2
Toma de muestra 3	2.8 ± 0.0
Toma de muestra 4	2.0 ± 0.1
Toma de muestra 5	1.1 ± 0.0

Cuadro 32: pH promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	pH
Toma de muestra 2	8.08 ± 0.88
Toma de muestra 3	7.15 ± 0.25
Toma de muestra 4	7.69 ± 0.44
Toma de muestra 5	7.91 ± 0.48

Cuadro 33: Conductividad eléctrica promedio en diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Toma de muestra 2	643.0 ± 163.5
Toma de muestra 3	728.8 ± 119.8
Toma de muestra 4	547.8 ± 135.4
Toma de muestra 5	443.0 ± 117.4

Cuadro 34: Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Remoción
Toma de muestra 2	14.18 ± 8.53
Toma de muestra 3	43.28 ± 25.77
Toma de muestra 4	60.87 ± 37.13
Toma de muestra 5	81.11 ± 81.51

Cuadro 35: Porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Remoción
Toma de muestra 2	63.45 ± 37.31
Toma de muestra 3	-150.89 ± -82.86
Toma de muestra 4	68.59 ± 63.40
Toma de muestra 5	35.07 ± 33.30

Cuadro 36: Porcentaje de remoción de nitrógeno en forma de NO_3^- a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Remoción
Toma de muestra 2	52.06 ± 49.46
Toma de muestra 3	7.15 ± 8.35
Toma de muestra 4	86.26 ± 54.93
Toma de muestra 5	29.44 ± 17.94

Cuadro 37: Porcentaje de remoción de fósforo en forma de PO_4^{3-} a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Remoción
Toma de muestra 2	2.04 ± 0.12
Toma de muestra 3	-2.08 ± -0.12
Toma de muestra 4	27.49 ± 0.69
Toma de muestra 5	43.53 ± 1.66

Cuadro 38: Porcentaje de variación del pH a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Variación
Toma de muestra 2	-0.12 ± -0.01
Toma de muestra 3	-21.28 ± -0.73
Toma de muestra 4	4.23 ± 0.24
Toma de muestra 5	-2.37 ± -0.14

Cuadro 39: Porcentaje de variación de la conductividad eléctrica a la salida de diferentes puntos de muestreo.

Punto de muestreo	% Variación
Toma de muestra 2	-9.69 ± -2.46
Toma de muestra 3	13.34 ± 2.19
Toma de muestra 4	-24.84 ± -6.14
Toma de muestra 5	-19.12 ± -5.07

H. Métodos de análisis realizados al agua residual.

1. Medición de pH. Para este análisis se utiliza el equipo HACH® sensION 156. El método es el siguiente:

- a. Conectar el electrodo de pH, alineando cuidadosamente los pines con el medidor de pH. Encender el medidor.
- b. Remover el electrodo de la solución de almacenamiento. Lavar y secar la punta del electrodo.
- c. Colocar el electrodo en una muestra de solución búfer estándar de 7.00 y colocar ambos sensores sumergidos. Agitar en forma adecuada.
- d. Si el medidor no está en pH, presionar el botón **pH**.
- e. Presionar **CAL**. **CAL** y **?** aparecerán parpadeando en la pantalla, junto con la palabra **Standard** y **1**.
- f. Presionar **READ**. El instrumento reconocerá el búfer y se estabilizará.
- g. Lavar y secar el electrodo.
- h. Colocar el electrodo en la segunda solución búfer con los sensores sumergidos. Agitar en forma adecuada.
- i. Presionar **READ**. El instrumento reconocerá el búfer y se estabilizará.
- j. Presionar **EXIT** para aceptar la calibración después de dos puntos, luego presionar **ENTER** para guardar la calibración.
- k. Lavar y secar el electrodo. Colocar el electrodo limpio en la muestra con los sensores sumergidos. Agitar la muestra.
- l. Presionar **READ**. El instrumento mostrará una lectura estable.
- m. Lavar y secar el electrodo entre mediciones de diferentes muestras.

2. Medición de conductividad. Para este análisis se utiliza el equipo HACH® sensION 156. El método es el siguiente:

- a. Conectar el electrodo de conductividad, alineando cuidadosamente los pines con el instrumento. Encender el instrumento.

- b. Seleccionar un estándar adecuado para la medición de la conductividad. HACH recomienda un estándar de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la mayoría de mediciones, incluyendo agua residual. Utilizar una solución estándar de 491 mg/L NaCl.
- c. Lavar y secar el electrodo.
- d. Colocar el electrodo en una muestra del estándar de conductividad con los sensores sumergidos. Agitar el electrodo para remover las burbujas. Evitar el contacto del electrodo con las paredes.
- e. Si el instrumento no está en el modo de conductividad, presionar el botón **CON**.
- f. Presionar **CAL**. Las unidades a emplear deben ser $\mu\text{S}/\text{cm}$. Utilizar las teclas numéricas en caso que se desee cambiar las unidades para el valor de conductividad.
- g. Presionar **ENTER**.
- h. Lavar y secar el electrodo.
- i. Colocar el electrodo limpio en una muestra con los sensores sumergidos. Agitar el electrodo para remover burbujas.
- j. Presionar **READ**. El instrumento mostrará un valor estable en $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- k. Lavar y secar el electrodo entre mediciones de diferentes muestras

3. Medición de sólidos suspendidos. Se utilizó el método 8006 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para sólidos suspendidos. Presionar **PRGM**. La pantalla mostrará: **PRGM ?**
- b. Presionar: **94 ENTER**. La pantalla mostrará **mg/L, SuSld** y el ícono **ZERO**.
- c. Licuar 500 mL de muestra en una licuadora a alta velocidad por dos minutos.
- d. Colocar la muestra licuada en un vaso de precipitados de 600 mL.
- e. Llenar la celda de muestra con 25 mL de agua desmineralizada.
- f. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- g. Presionar: **ZERO**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: **0 mg/L SuSld**.
- h. Agitar la muestra e inmediatamente agregar 25 ml de la muestra licuada a la celda de muestra (la muestra preparada).

- i. Remover cualquier burbuja de gas y suspender uniformemente cualquier residuo de la muestra.
- j. Colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- k. Presionar: **READ**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado de sólidos suspendidos en mg/L.

4. Medición de nitrógeno en forma de NO_3^- . Se utilizó el método de reducción de cadmio para agua, agua residual y agua de mar, en base al método 8039 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para nitrógeno-nitrato de alto rango. Presionar **PRGM**. La pantalla mostrará: **PRGM ?**
- b. Presionar: **51 ENTER**. La pantalla mostrará **mg/L, NO3-N** y el ícono **ZERO**.
- c. Llenar una celda con 10 mL de la muestra.
- d. Agregar el contenido de un polvo de reactivo para nitrógeno en forma de NO_3^- NitraVer 5 a la celda de la muestra. Tapar la celda.
- e. Presionar: **TIMER ENTER**. Un período de reacción de un minuto empezará. Agite vigorosamente la celda de muestra hasta que el temporizador suene.
- f. Después que suene el temporizador, la pantalla mostrará: **5:00 TIMER 2**. Presione **ENTER**. Un período de reacción de cinco minutos empezará.
- g. Llenar otra celda con 10 mL de muestra. Limpie cualquier huella dactilar o líquido en el exterior de la celda.
- h. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- i. Cuando suene el temporizador, presionar: **ZERO**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: **0.0 mg/L NO3-N**.
- j. Colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- k. Presionar: **READ**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado, en mg/L NO_3^- -N.

5. Medición de fósforo reactivo. Se utilizó el método de ácido ascórbico par agua, agua residual y agua de mar en base al método 8048 del colorímetro HACH ® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para fósforo reactivo, método de ácido ascórbico. Presionar **PRGM**. La pantalla mostrará: **PRGM ?**
- b. Presionar: **79 ENTER**. La pantalla mostrará **mg/L, PO4** y el ícono **ZERO**.
- c. Llenar una celda con 10 mL de la muestra.
- d. Agregar el contenido de un polvo de reactivo para fosfatos PhosVer 3 a la celda de la muestra. Tapar la celda y agitar por 15 segundos.
- e. Presionar: **TIMER ENTER**. Un período de reacción de dos minutos empezará.
- f. Llenar otra celda con 10 mL de muestra, la cual será el blanco.
- g. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- h. Presionar: **ZERO**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: **0.00 mg/L PO4**.
- i. Cuando suene el temporizador, colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- j. Presionar: **READ**. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado, en mg/L PO_4^{-3} .

6. Medición de coliformes totales y E. Coli. Se hace referencia al método de Número Más Probable Modificado (Colilert QuantiTray 2000®), aprobado por los Métodos Estándar para el análisis de agua y aguas residuales (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). American Public Health Association (APHA), 20ma Edición.

I. Especificaciones técnicas de equipos instalados en la planta de tratamiento.

1. Bomba centrífuga.

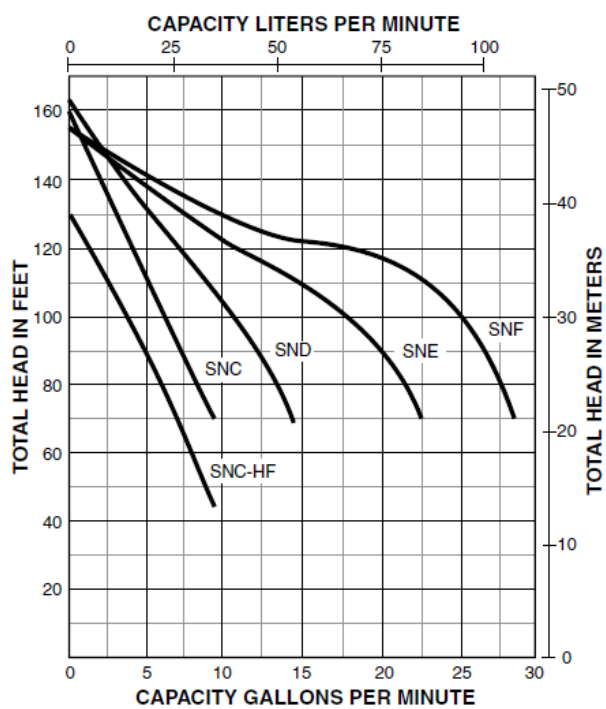
Cuadro 40: Especificaciones técnicas de la bomba centrífuga utilizada para el ingreso de agua residual a la planta.

Marca	STA-RITE ®
Modelo	SNC-L
Código	00C128
Número Motor	C48H2EC11C8
Potencia nominal motor	0.5 hp
Voltaje motor	115 / 230 V
Corriente máxima	9.9 / 4.95 A
Fase motor	Monofásico
Frecuencia motor	60 Hz
Revoluciones motor	3450 rpm
Diámetro tubería succión	1 ¼ pulgada
Diámetro tubería descarga	1 pulgada

Ilustración 13: Vista lateral de la bomba centrífuga STA-RITE ® SNC-L.



Ilustración 14: Curva característica de la bomba centrífuga STA-RITE ® SNC-L.



2. Bomba dosificadora.

Cuadro 41: Especificaciones técnicas de la bomba dosificadora utilizada para el ingreso de agua residual al biofiltro.

Marca	PULSAFEEDER ®
Modelo	Pulsatron
Serie	C Plus
Número de Serie	379411
Caudal nominal	6 gal/día (0.9 L/h)
Presión máxima	80 psi (5.6 bar)
Voltaje	115 V
Corriente máxima	0.4 A
Fase	Monofásico
Frecuencia	50 / 60 Hz

Ilustración 15: Bomba dosificadora PULSAFEEDER ® Pulsatron C Plus.



3. Bomba de aire.

Cuadro 42: Especificaciones técnicas de la bomba de aire utilizada para el ingreso de aire al biofiltro.

Marca	HAGEN®
Modelo	Elite
Serie	800
Caudal nominal	1500 cm ³ /min (2.5x10 ⁻⁵ m ³ /s)
Presión máxima	2.5 psi (0.17 bar)
Voltaje	120 V
Potencia máxima	2 W
Fase	Monofásico
Frecuencia	60 Hz

Ilustración 16: Vista frontal de la bomba Hagen ® Elite 800



J. Registro gráfico de la construcción, instalación y operación de la planta de tratamiento.

1. Recolección y procesamiento de material filtrante

Ilustración 17: Árboles de ficus podados, donados por una empresa de alimentos.



Ilustración 18: Ramas de ficus podadas.



Ilustración 19: Trituración mecánica de las ramas de ficus con el equipo TRAPP® TR200.



Ilustración 20: Secado solar de ramas de ficus trituradas.



Ilustración 21: Tamizado de ramas de ficus trituradas en una malla con ½" de apertura.



Ilustración 22: Selección manual del material filtrante a partir de ramas de ficus trituradas.



2. Instalación de equipo para tratamiento secundario de agua residual

Ilustración 23: Terreno seleccionado para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales.



Ilustración 24: Fundición de bases de cemento para soporte de fosa séptica y estructura metálica para el biofiltro.



Ilustración 25: Fundición de bases de cemento para soporte de los humedales de flujo subterráneo.



Ilustración 26: Colocación de la estructura metálica del biofiltro y tanques para humedales.



Ilustración 27: Colocación de cubetas con tapadera de 40 L de capacidad para fosa séptica.



3. Conexiones a proceso e instalaciones eléctricas de la planta de tratamiento.

Ilustración 28: Colocación de tubería de PVC 1/2" y poliducto 1" en zanja de 15 cm de profundidad.



Ilustración 29: Fundición de caja para bomba centrífuga Sta-Rite ®.



Ilustración 30: Contactor utilizado para la bomba centrífuga.



Ilustración 31: Caja de interruptores de corriente general, con un interruptor de corriente instalado de 40 A, 240 V.



Ilustración 32: Caja metálica de 70x35x30 cm para colocación de contactor, selector de tres posiciones, botón Start/Stop, bomba dosificadora y bomba de aire.



Ilustración 33: Instalación de caja metálica de 70x35x30 cm adjunta a la estructura metálica del biofiltro.



Ilustración 34: Detalle interno del motor de la bomba centrífuga.



4. Construcción de biofiltro

Ilustración 35: Estructura metálica que soporta el biofiltro.



Ilustración 36: Colocación de tapadera de PVC al tubo de acrílico del biofiltro.



Ilustración 37: Llenado del biofiltro con piedrín.



Ilustración 38: Llenado del biofiltro con las ramas de ficus trituradas.



Ilustración 39: Pruebas de arranque del biofiltro con agua potable.



5. Planta de tratamiento con sistemas naturales.

Ilustración 40: Planta de tratamiento con sistemas naturales, ubicada en las instalaciones del Edificio de los Colegios Profesionales.



Ilustración 41: Vista frontal de la planta de tratamiento con sistemas naturales.



Ilustración 42: Biofiltro al día 28 de operación de la planta.



Ilustración 43: Primer humedal al día 28 de operación de la planta.



Ilustración 44: Primer humedal al día 49 de operación de la planta.



Ilustración 45: Material filtrante orgánico al inicio de la operación de la planta.



Ilustración 46: Material filtrante orgánico al día 28 de operación.



Ilustración 47: Material filtrante orgánico al día 49 de operación.



Ilustración 48: Material filtrante orgánico al día 56 de operación.



K. Costos de construcción de la planta de tratamiento.

Los costos de construcción de la planta de tratamiento instalada en el Edificio de los Colegios Profesionales se dividen en: mano de obra, bombas, materiales plásticos, materiales eléctricos, materiales de construcción y otros.

Para estimar el costo de mano de obra se utilizó como base el salario mínimo por hora ordinaria establecido en el Acuerdo Gubernativo 520-2011 emitido por el Ministerio de Trabajo y Previsión Social y el Presidente de la República de Guatemala, el cual fue de Q8.50 para el año 2012.

Como ejemplo, se toma el cálculo del costo de la preparación del terreno para la instalación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

$$(2 \text{ trabajadores}) \left(\frac{16 \text{ horas trabajadas}}{1 \text{ trabajador}} \right) \left(\frac{Q8.50}{1 \text{ hora trabajada}} \right) = Q272.00$$

En el caso de la instalación de conexiones eléctricas se hizo un estimado de que el costo por hora es el triple del salario mínimo, debido a que para dicha actividad se requiere como mínimo personas con los conocimientos técnicos necesarios y experiencia sobre el control e automatización de procesos químicos. Además, para la supervisión se estimó un costo cuatro veces mayor al del salario mínimo debido a que las personas que ejecutan esta labor deben ser, como mínimo, ingenieros químicos graduados y con experiencia en la tecnología de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales.

Por último, el costo de las prestaciones fueron calculadas como el 46% del total sin prestaciones de la mano de obra, las cuales incluyen: IGSS (8.33%), IRTRA (1.00%), bono 14 (8.33%), aguinaldo (8.33%), INTECAP (1.00%), pasivo laboral (8.33%), capacitación (8.33%) y bono incentivo (Q250.00). Para esto, se asumió que las personas

están bajo contrato individual de trabajo según lo establece el Código de Trabajo y la jornada laborada es diurna.

Cuadro 43: Costo de mano de obra para la construcción de la planta de tratamiento.

Número de trabajadores	Actividad realizada	Tiempo (horas)	Costo por hora	Costo Total
2	Preparación de terreno para instalación de la planta.	16	Q8.50	Q272.00
3	Construcción de estructura metálica que soporta el biofiltro.	8	Q8.50	Q204.00
2	Trámites administrativos.	20	Q8.50	Q340.00
3	Fundición de cimientos de la fosa séptica, biofiltro y humedales.	8	Q8.50	Q204.00
2	Construcción de caja para bomba centrífuga Sta-Rite ® de 0.5 hp.	4	Q8.50	Q68.00
2	Instalación y cebado de bomba centrífuga Sta-Rite ® de 0.5 hp.	12	Q8.50	Q204.00
2	Abertura de zanjas para conexiones a proceso y eléctricas.	8	Q8.50	Q136.00
2	Instalación de biofiltro en el Edificio de los Colegios Profesionales.	12	Q8.50	Q204.00
2	Instalación de humedales en el Edificio de los Colegios Profesionales.	15	Q8.50	Q255.00
2	Instalación de la fosa séptica en el Edificio de los Colegios Profesionales.	4	Q8.50	Q68.00
2	Instalación de conexiones a proceso en la planta de tratamiento.	12	Q8.50	Q204.00
3	Instalación de conexiones eléctricas en la planta de tratamiento.	15	Q25.50	Q1,147.50
2	Supervisión de construcción de la planta de tratamiento.	12	Q34.00	Q816.00
Total sin prestaciones				Q4,122.50
Prestaciones				Q1,896.35
Total con prestaciones				Q6,018.85

Cuadro 44: Costo de materiales y equipo utilizados para la construcción de la planta de tratamiento.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
Bombas			
1	Bomba centrífuga (Datos de placa en Apéndice I, página 85)	Q2,197.52	Q2,197.52
1	Bomba dosificadora (Datos de placa en Apéndice I, página 87)	Q5,373.90	Q5,373.90
1	Bomba de aire (Datos de placa en Apéndice 85, página 88)	Q150.00	Q150.00
Materiales de plástico			
2	Tapaderas de PVC con rosca 4" de diámetro	Q42.66	Q85.32
1	Tubo de acrílico 5" x 1.84 m	Q1,849.77	Q1,849.77
3	Cubeta plástica con tapadera 40 L	Q55.25	Q165.75
11	Tubo PVC 1/2"	Q35.50	Q390.50
15	Uniones universales 1/2" de PVC	Q13.00	Q195.00
5	Codos 1/2" de 90° de PVC	Q1.90	Q9.50
10	Codos 1/2" de 45° de PVC	Q1.90	Q19.00
10	T 1/2" de PVC	Q2.20	Q22.00
10	Uniones universales 1/2" de PVCE -anaranjada-	Q2.30	Q23.00
3	Válvula de globo de PVC 1/2"	Q10.00	Q30.00
100	Metro poliducto 1"	Q7.20	Q720.00
2	Adaptadores Macho 1/2" PVC	Q3.40	Q6.80
20	Pie Manguera Nylon Ice Maker 1/4"	Q14.60	Q292.00
Materiales eléctricos			
1	Rollo cable eléctrico # 6 100 m color verde	Q1,831.50	Q1,831.50

(Continuación Cuadro 44)

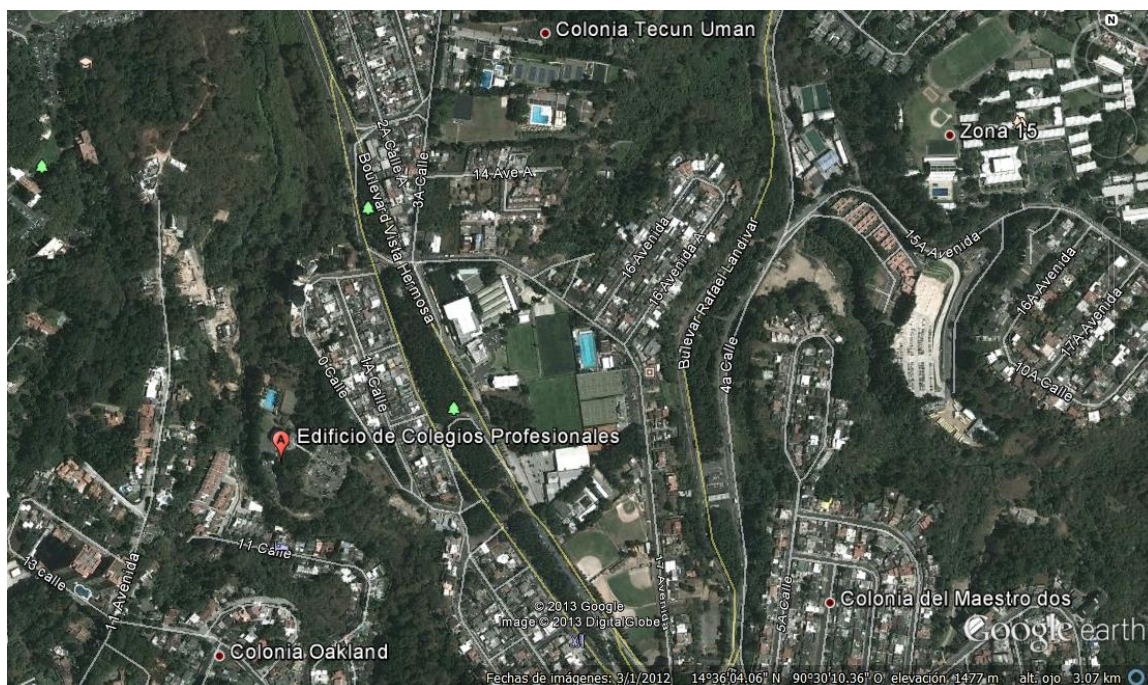
Materiales eléctricos (continuación)			
1	Rollo cable eléctrico # 6 100 m color rojo	Q1,831.50	Q1,831.50
1	Rollo cable eléctrico # 6 100 m color blanco	Q1,831.50	Q1,831.50
1	Conectores de cable eléctricos para empalmes	Q16.43	Q49.29
2	Interruptor de corriente 2X20 A	Q136.00	Q272.00
1	Interruptor de corriente 20 A	Q54.00	Q54.00
1	Caja para 4 interruptores 220V	Q268.20	Q268.20
Materiales de construcción			
12	Sacos de cemento preparado de 3/8"	Q64.30	Q771.60
2	Metro cúbico piedrín	Q186.90	Q373.80
5	Angular hembra hierro negro 1/8"x1"x6 m	Q116.00	Q580.00
4	Tubo cuadrado hierro negro chapa 18 de 2"x2"x6 m	Q210.00	Q840.00
1	Electromalla de 1/4"	Q398.00	Q398.00
3	Varillas corrugadas de 3/8"	Q48.70	Q48.70
3	Reglas de madera de 1"x4"x10'	Q26.40	Q79.20
4	Cajas de registro	Q35.00	Q140.00
15	Block de concreto	Q4.15	Q62.25
Otros			
2	Plantas cartucho blanco	Q28.00	Q56.00
6	Plantas cola de caballo	Q26.80	Q160.80
10	Rollos Teflón 1/2"	Q3.10	Q31.00
3	Caja de registro concreto	Q25.00	Q75.00
1	Pichacha de bronce 1"	Q65.00	Q65.00
1	Medidor de nivel para bomba	Q395.00	Q395.00

(Continuación Cuadro 44)

Otros (continuación)			
1	Bote de pegamento para PVC 1/8"	Q136.00	Q136.00
5	Llave de bola de 1/4" de diámetro de bronce	Q76.00	Q380.00
5	Libra de electrodos punta café	Q19.60	Q98.00
15	Abrazaderas de metal 1"	Q2.40	Q36.00
15	Abrazaderas de metal 1/2"	Q0.40	Q6.00
1	Empaques de hule 1/4"	Q20.00	Q20.00
1	Caja de guantes de látex M	Q141.75	Q141.75
1	Caja de guantes de látex XS	Q141.75	Q141.75
30	Recipientes de 1L de plástico para muestras	Q24.10	Q723.00
1	Unión universal de hierro galvanizado 1"	Q17.00	Q17.00
10	Niple de hierro galvanizado de 1" y 1 1/4"	Q10.00	Q100.00
1	Te de hierro galvanizado 1"	Q15.00	Q15.00
1	Reducidor de hierro galvanizado de 1 1/4" a 1"	Q25.00	Q25.00
2	Reducidor de hierro galvanizado de 1" a 1/2"	Q25.00	Q50.00
1	Codo de 90° de hierro galvanizado	Q15.00	Q15.00
	TOTAL		Q23,784.30

L. Ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales

Ilustración 49: Vista satelital de la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.



Cuadro 45: Características geográficas del Edificio de los Colegios Profesionales.

Característica	Descripción
Coordenadas geográficas	14°34'04.06" N 90°30'10.36" O
Dirección	0 calle, 15-46 zona 15, Colonia El Maestro
Municipio	Guatemala
Departamento	Guatemala
Altitud	1477 msnm
Punto de referencia	A la izquierda del Boulevard Vista Hermosa, dirección oriente.

XIV. GLOSARIO

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

Agua residual: Líquido cuyas propiedades han sido modificadas debido a su uso en actividades domésticas, industriales o agrícolas.

Agua residual doméstica: También llamada agua residual ordinaria, es aquella que ha sido utilizada en actividades domésticas ya sea en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.

Aireación: Proceso de transferencia de masa en donde el oxígeno es transferido del aire al agua, ya sea por medios naturales o artificiales.

Biofiltro: Equipo utilizado para el tratamiento secundario de agua residual que, por medio de la acción de microorganismos, captura y degrada biológicamente los contaminantes que se encuentran en ella.

Carga: Producto del caudal por la concentración de un parámetro específico, en unidades de masa por unidad de tiempo.

Caudal: Volumen de agua por unidad de tiempo.

Coliformes fecales: Conjunto de bacterias Gram negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 horas de incubación a 44.5 ± 0.1 °C.

Coliformes totales: Conjunto de bacilos Gram negativos aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, que fermentan la lactosa con producción de gas en un lapso máximo de 48 horas a 35 ± 1 °C.

Demanda bioquímica de oxígeno: Estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un período de 5 días.

Demanda química de oxígeno: Cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte.

Efluente: Agua residual que sale de un proceso de tratamiento.

Eutrofización: Proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

Fosa séptica: Proceso de tratamiento primario en donde ocurre la separación física y degradación biológica del agua residual.

Humedales: Áreas saturadas por aguas superficiales o subterráneas en forma permanente.

Muestra compuesta: Dos o más muestras simples que se toman en intervalos de tiempo determinados y que se adicionan para obtener un resultado de las características del agua residual.

Muestra simple: Muestra tomada en una sola operación que representa las características del agua residual al momento de la toma.

Oxígeno disuelto: Cantidad de oxígeno en forma gaseosa que se encuentra disuelta en el agua en forma líquida.

Plantas emergentes: Plantas que crecen en aguas poco profundas y que se extienden a una longitud que les permite entrar en contacto con el aire.

Recursos hídricos: Agua superficial, subterránea y continental que es útil o potencialmente útil en actividades agrícolas, industriales, domésticas, recreacionales o ambientales.

Reuso: El aprovechamiento de un efluente, ya sea tratado o no.

Sistemas naturales de tratamiento: Conjunto de mecanismos y procesos naturales que remueven contaminantes del agua residual sin utilizar energía externa al sistema y sin la adición de químicos.

Tiempo de retención hidráulico: Tiempo medio teórico que permanecen las partículas de líquido en un proceso de tratamiento.

Tratamiento de aguas residuales: Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los anteriores que es utilizado para mejorar la calidad del agua residual.

