



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Sanitaria y  
Recursos Hidráulicos (ERIS)

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**Ing. Alejandro Rojas Rodríguez**

Asesorado por el M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, julio de 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**ING. ALEJANDRO ROJAS RODRÍGUEZ**

ASESORADO POR

**M.SC ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE COLLAZOS**

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRÍA (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS DE INGENIERÍA  
SANITARIA**

GUATEMALA, JULIO DE 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIO	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS**

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera aprobado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado (CAyOG) de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), según consta en Acta No. 007-2016 con fecha de aprobación 19 septiembre de 2016.

**Ing. Alejandro Rojas Rodríguez**  
**Correo electrónico: alerojas916@gmail.com**  
**Carné: 201690153**





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por la gracia que me ha concedido al darme sabiduría, el entendimiento y las fuerzas suficientes para afrontar con voluntad y obediencia las adversidades de la vida y las metas propuestas.

### **Mi mamá**

Por la educación y formación con la cual me formó; por inculcarme los valores y hacerme una persona de éxito, por ser mi gran inspiración en la vida.

### **Mi familia**

Por los consejos, el aliento y apoyo incondicional en pro del crecimiento personal y profesional.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Servicio Alemán  
de Intercambio  
Académico, (DAAD)**

Por el apoyo y las facilidades brindadas en pro del enriquecimiento personal y el incremento de mis conocimientos con una Maestría en Ciencias.

**USAC**

Por dirigir, organizar y desarrollar la educación superior de una manera íntegra, formando profesionales con principios éticos y excelencia académica.

**ERIS**

A cada uno de sus integrantes, por haber permitido que profundizara el conocimiento dentro del área técnico-científica de las ramas de la ingeniería sanitaria.

**Mis catedráticos**

Por todo el apoyo brindado en la culminación de esta investigación y en el transcurso de la maestría.

**Laboratorio  
ECOQUIMSA**

Por el apoyo constante en la investigación, por permitirme el uso de su equipo y haberme brindado el conocimiento técnico de alta calidad.

**Mis compañeros**

Por la ayuda y hospitalidad brindada durante mi estancia en Guatemala.





Guatemala, 03 de Julio de 2017

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE  
GUATEMALA**

Presentado por el estudiante:

**Ing. Alejandro Rojas Rodríguez**

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria





Guatemala, 05 de julio de 2017

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, y M.Sc. Ing. Félix Douglas Aguilar Carrera, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria ; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Aura Mayorga Salguero de Argueta, Colegiada No. 2702, al trabajo del estudiante Ing. Alejandro Rojas Rodríguez del sustentante, titulado: **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala al quinto día del mes de julio de 2017.

**Imprímase**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR





## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS.....	XIX
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XXI
ANTECEDENTES.....	XXIII
ALCANCE .....	XXV
LIMITACIONES.....	XXVII
INTRODUCCIÓN .....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Gestión ambiental y aguas residuales domésticas en Guatemala.....	1
1.2. Tratamiento de las aguas residuales.....	4
1.3. Normativas internacionales del ACV .....	7
1.4. Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	8
1.4.1. Fases del ACV.....	8
1.4.1.1. Definición del objetivo y alcance.....	9
1.4.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida..	9
1.4.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida.....	10
1.4.1.4. Interpretación de resultados .....	11
1.5. Limitaciones del ACV .....	11

1.5.1.	Calidad de los datos.....	12
1.5.2.	Existencia de diversas metodologías de evaluación del impacto en el ACV .....	12
1.5.3.	Poca sofisticación de las categorías de impacto .....	12
1.5.4.	Escasa valoración de la incertidumbre en los ACV's.....	13
2.	UNIVERSO DEL TRABAJO.....	15
2.1.	Planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.....	15
2.2.	Ubicación .....	16
2.3.	Localización .....	17
2.4.	Descripción de la planta de tratamiento .....	18
2.4.1.	Pretratamiento.....	20
2.4.2.	Tratamiento primario .....	21
2.4.3.	Tratamiento secundario.....	22
2.4.4.	Digestor de lodos y patio de secado .....	26
3.	METODOLOGÍA.....	29
3.1.	Análisis del ciclo de vida social .....	30
3.1.1.	Definición del objetivo y alcance .....	31
3.1.2.	Análisis de inventario .....	31
3.1.2.1.	Desarrollo de criterios de evaluación ..	31
3.1.2.2.	Recopilación de datos .....	34
3.1.3.	Evaluación de impactos .....	35
3.2.	Análisis económico.....	40
3.2.1.	Definición del objetivo y el alcance .....	40
3.2.2.	Estudio económico.....	41
3.3.	Análisis del ciclo de vida ambiental .....	47
3.3.1.	Definición del objetivo y alcance .....	48

3.3.2.	Análisis del inventario .....	51
3.3.3.	Evaluación de impactos .....	58
3.3.3.1.	Metodología CML 2001 .....	59
3.3.3.2.	Metodología ICC .....	62
3.4.	Análisis técnico .....	66
3.4.1.	Operación y mantenimiento idóneo de las PTAR´s .....	66
3.4.2.	Resultados y eficiencias de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos .....	71
3.4.3.	Diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos .....	89
3.4.4.	Evaluación de tecnología de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos .....	93
3.4.5.	Factibilidad técnica .....	95
4.	RESULTADOS .....	97
4.1.	Análisis del ciclo de vida social .....	98
4.2.	Análisis económico .....	99
4.3.	Análisis del ciclo de vida ambiental .....	99
4.4.	Análisis técnico .....	100
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	103
5.1.	Análisis del ciclo de vida social .....	103
5.1.1.	Trabajadores .....	103
5.1.2.	Usuarios .....	105
5.1.3.	Consumidores .....	106
5.1.4.	Proveedores .....	107

5.2.	Análisis económico.....	107
5.3.	Análisis del ciclo de vida ambiental .....	110
5.4.	Análisis técnico.....	112
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	117
	CONCLUSIONES.....	123
	RECOMENDACIONES .....	125
	BIBLIOGRAFÍA.....	127
	ANEXOS.....	133

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento de las aguas residuales.....	6
2.	Estructura de interrelación entre las fases del ACV .....	9
3.	Acceso a la PTAR de la USAC.....	16
4.	Ubicación PTAR-USAC .....	17
5.	Vista aérea de la PTAR-USAC .....	18
6.	Esquema de la PTAR-USAC .....	19
7.	Vista general de las unidades que componen el pretratamiento de la PTAR (cámara de ingreso, rejillas, canal desarenador y fosa).....	21
8.	Sistema de distribución del agua residual sobre los filtros percoladores..	24
9.	Sistema de aireación y recolección del agua residual percolada .....	25
10.	Sedimentador secundario.....	26
11.	Digestor de lodos y patio de secado.....	27
12.	Análisis del ciclo de vida modificado .....	30
13.	Diagrama de la metodología del análisis del ciclo de vida social .....	30
14.	Diagrama de la metodología del análisis del ciclo de vida ambiental.....	47
15.	Subsistema 1 de la PTAR-USAC .....	52
16.	Subsistema 2 de la PTAR-USAC .....	52
17.	Subsistema 3 de la PTAR-USAC .....	52
18.	Subsistema 4 de la PTAR-USAC .....	53
19.	Variación del caudal de agua residual que ingresa a la PTAR de la USAC.....	71
20.	Variación de la concentración de materia orgánica, DBO <sub>5</sub> .....	73
21.	Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno, DQO.....	75

22.	Variación de la concentración de los sólidos suspendidos .....	76
23.	Variación de la temperatura promedio, T .....	77
24.	Variación del potencial de hidrógeno, pH.....	79
25.	Variación de la concentración de oxígeno disuelto, OD.....	80
26.	Variación de la concentración de nitratos, NO <sub>3</sub> .....	81
27.	Variación de la concentración de coliformes fecales, CF.....	83
28.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO <sub>5</sub> .....	84
29.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	86
30.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de los sólidos suspendidos, SS .....	87
31.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de CF.....	88
32.	Ponderación final de las categorías ACV social.....	98
33.	Impactos generados en la PTAR, producto del proceso de tratamiento del agua, metodología CML 2001 .....	100
34.	Costos operativos anuales de la PTAR-USAC.....	108
35.	Indicadores de impacto de la categoría de eutrofización .....	111

## TABLAS

I.	Cobertura de saneamiento en Guatemala, año 2011 .....	2
II.	Categorías de estudio .....	32
III.	Número de grupos de interés e indicadores correspondientes .....	33
IV.	Categorías e indicadores de interés.....	33
V.	Número de entrevistados y tipo de cuestionario utilizado .....	34
VI.	Cantidad de preguntas por categoría.....	34
VII.	Criterios de ponderación para la evaluación de impactos sociales .....	36

VIII.	Ejemplo de ponderación de cada pregunta, según su categoría y cuestionario .....	37
IX.	Ejemplo de ponderación de preguntas por indicador .....	38
X.	Ejemplo de ponderación de promedio de indicadores por categoría .....	39
XI.	Ponderación final según resultados de las categorías .....	39
XII.	Costo de inversión PTAR-USAC .....	42
XIII.	Ritmo inflacionario desde 1989 hasta marzo del 2017 .....	43
XIV.	Costos anuales de operación y mantenimiento de la PTAR-USAC.....	45
XV.	Costo total mensual por operación y mantenimiento.....	45
XVI.	Costo unitario mensual por metro cúbico tratado .....	46
XVII.	Área por metros cúbicos tratados al mes .....	46
XVIII.	Configuración de los subsistemas de la PTAR-USAC.....	51
XIX.	Pruebas de normalidad de datos del afluente de la PTAR-USAC.....	55
XX.	Pruebas de normalidad de datos del efluente de la PTAR-USAC.....	56
XXI.	Frecuencia y método experimental utilizado para la realización del ACV.....	56
XXII.	Datos del afluente y efluente de la PTAR-USAC.....	57
XXIII.	Clasificación de las categorías de impacto según su factor de caracterización y unidad de referencia .....	59
XXIV.	Caracterización de 1 m <sup>3</sup> del efluente descargado.....	61
XXV.	Análisis normalizado de 1 m <sup>3</sup> del efluente descargado.....	62
XXVI.	Variables y pesos del ICC .....	64
XXVII.	Aplicación del ICC para la PTAR de la USAC .....	65
XXVIII.	Código de color del ICC .....	66
XXIX.	Valores de caudal máximo, mínimo y medio .....	72
XXX.	Variación de la concentración de materia orgánica, DBO <sub>5</sub> .....	72
XXXI.	Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno DQO.....	74
XXXII.	Variación de la concentración de los sólidos suspendidos, SS .....	75

XXXIII.	Variación de la temperatura promedio, T .....	76
XXXIV.	Variación del potencial de hidrógeno, pH.....	78
XXXV.	Variación de la concentración de oxígeno disuelto, OD.....	79
XXXVI.	Variación de la concentración de nitratos, NO <sub>3</sub> .....	80
XXXVII.	Variación de la concentración de coliformes fecales, CF.....	82
XXXVIII.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO <sub>5</sub> .....	83
XXXIX.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	85
XL.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de sólidos suspendidos, SS .....	86
XLI.	Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de coliformes fecales, CF.....	87
XLII.	Diagnóstico cualitativo y cuantitativo de la PTAR de la USAC.....	89
XLIII.	Matriz de evaluación tecnológica para la PTAR de la USAC .....	94
XLIV.	Resultado final del análisis del ciclo de vida de la PTAR de la USAC .....	97
XLV.	Comparación de ACV's de diferentes tecnologías.....	121



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Bióxido de carbono
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>KW-h</b>	Kilovatio-hora
<b>L</b>	Litros
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzal



## GLOSARIO

<b>ACV (o LCA)</b>	Análisis de Ciclo de Vida. (LCA por sus siglas en inglés, “ <i>Life Cycle Analysis</i> ”). Metodología que permite identificar la distribución de las cargas aplicadas al medio ambiente por un producto, a lo largo de su vida útil, desde la obtención de los recursos para su fabricación, hasta su desecho como residuo (Goedkoop, et al., 2013).
<b>ACV-S</b>	Análisis del Ciclo de Vida Social.
<b>ACV-A</b>	Análisis del Ciclo de Vida Ambiental.
<b>Afluente</b>	Caudal de agua que llega a una planta o unidad de tratamiento.
<b>Agua residual</b>	Las aguas que han recibido uso y cuyas características han sido modificadas.
<b>Biogénico</b>	El CO <sub>2</sub> puede originarse de manera biogénica, cuando las emisiones provienen de la combustión de biomasa del tratamiento de la materia orgánica que da lugar a estas emisiones, lo cual corresponde a emisiones de carbono neutral.
<b>Caudal</b>	El volumen de agua por unidad de tiempo.

<b>CML</b>	Center of Environmental Science of Leiden University.
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación (por vía biológica) de la materia orgánica biodegradable (utilizada por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica), bajo condiciones aerobias, en un período de 5 días.
<b>DQO</b>	Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación (por vía química) provocada por un agente químico fuertemente oxidante.
<b>Efluente</b>	Caudal de agua tratada que sale de una planta o unidad de tratamiento.
<b>Eutrofización</b>	Resultado del enriquecimiento excesivo de nutrientes de los ambientes acuáticos, que genera un incremento en el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la flora y fauna.
<b>INSF</b>	Índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos.
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés),

principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988.

**ICC**

Índice de Carga Contaminante.

**PTAR**

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

**pH**

Potencial de Hidrógeno.

**USAC**

Universidad de San Carlos de Guatemala



## RESUMEN

En este proyecto efectúa un análisis de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos. En ella recaen todas las aguas residuales generadas en la ciudad universitaria, lo cual influye posteriormente en un costo de operación y mantenimiento en la planta, un impacto al ambiente, y eventualmente problemas sociales y/o técnicos.

Para ello se realiza un estudio integral del proceso de tratamiento de la planta de aguas residuales, según la tecnología de tratamiento, las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua tratada, los costos que conlleva este proceso y los impactos al ambiente asociados. Lo anterior se realiza basándose en el análisis del ciclo de vida (ACV) de la planta como tal y de los elementos que actúan en cada unidad. Para esto se utilizan datos de costos en función del agua tratada, los cálculos y conversiones necesarias para determinar los impactos ambientales y la problemática social que se puede crear. De esta forma se abordan aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos.

Finalmente, se concluye que la PTAR de la Universidad de San Carlos tiene una ponderación final en el aspecto social aceptable (62,5 %). En el aspecto económico, se da un costo por metro cúbico de agua tratada de Q1,45 y un área requerida aproximada de 0,24 metros cuadrados por metros cúbicos tratados al mes. En el aspecto ambiental, un impacto nulo en la categoría de agotamiento de los recursos abióticos, mientras que en las categorías de eutrofización y cambio climático se generan 0,036 kg eq  $PO_4/m^3$  y 0,2563 Kg eq  $CO_2/m^3$ , respectivamente. Complementando los aspectos anteriores con otras variables, se obtiene una nota porcentual final en el aspecto técnico de 84,7 %.





## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha observado un aumento continuo en la generación de aguas residuales que, en muchas ocasiones, se vierten con tratamiento parcial o poco eficiente a los cuerpos receptores, produciendo cierto grado de contaminación.

Esto ha llevado a que los países implementen leyes y normativas que regulen la calidad del vertido de las aguas residuales a los cuerpos receptores. Ante esto, la industrialización y el desarrollo urbano han buscado la manera de cumplir con la legislación en la disminución de la concentración de contaminantes como un tema puntual o local a los menores costos y sin un análisis integral. Ocasionando la transferencia de los problemas en el espacio y en el tiempo pero no la erradicación del mismo.

La planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos emplea un proceso para eliminar la carga contaminante de las aguas residuales mediante procesos físicos y biológicos que aceleran su eliminación. Producto de esto son los impactos ambientales asociados al proceso de tratamiento; es importante identificarlos, cuantificarlos y sopesarlos respecto de la eficiencia de la planta (en cuanto a remoción de carga contaminante, nutrientes y generación de lodos), los costos de operación y mantenimiento, cambio climático (emanación de gases de efecto invernadero) y ciertas variables en conformidad con la sociedad. Análisis que a su fecha no se ha realizado y que tiene a la planta operando de una manera parcial si involucrar de una manera integral todas las variables mencionadas.



## JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

Asociados a una mala evaluación y conceptualización de los problemas y características de las aguas residuales, se ha generado una construcción descontrolada de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's) con poca eficiencia, que logren abordar realmente el deterioro de los recursos ambientales.

Por ello se ha generado la necesidad de identificar mecanismos que permitan la continuidad de las actividades antropogénicas bajo los principios de sostenibilidad. En el control de la contaminación por aguas residuales los procesos de selección de tecnología y propuestas de mejora en los procesos en curso se han centrado en aspectos técnicos y sociales, abordando solo de manera cuantitativa la componente ambiental.

En este contexto la investigación busca contribuir a la aplicación del concepto del Análisis de Ciclo de Vida en el estudio de los impactos ambientales, técnicos, económicos y sociales en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala. De manera que se puedan relacionar todos estos aspectos para la identificación y cuantificación de los impactos antes mencionados, con el fin de establecer criterios y propuestas de mejora con el menor impacto posible.



# OBJETIVOS

## General

Aplicar de una manera integral la metodología del análisis del ciclo de vida a la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos, para determinar y cuantificar los aspectos e impactos ambientales, técnicos, económicos y sociales, asociados al proceso de tratamiento de las aguas.

## Específicos

1. Determinar los efectos sociales coligados al proceso de tratamiento de las aguas residuales, a través de la metodología del análisis del ciclo de vida social planteada por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, (UNEP 2009).
2. Realizar un análisis que contemple el estudio detallado de los costos que engloba el proceso de tratamiento de la planta, a manera de abordar los aspectos económicos asociados a la planta de tratamiento.
3. Evaluar los impactos ambientales asociados al proceso de tratamiento de la planta a través de la metodología del ACV, para generar alternativas integrales de mejora.
4. Efectuar un análisis técnico que contemple un diagnóstico operativo y una evaluación de la tecnología aplicada a las aguas residuales tratadas en la planta, con el fin de generar alternativas de mejora.

5. Identificar la eficiencia de la planta en materia de remoción de cargas contaminantes y nutrientes, por medio de ensayos de laboratorio.

## **HIPÓTESIS**

La herramienta de análisis de ciclo de vida permite evaluar los aspectos e impactos técnicos, económicos, ambientales y sociales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## ANTECEDENTES

El ACV es una metodología que permite identificar la distribución de las cargas ambientales a lo largo de la vida útil de un producto o proceso, identificando y cuantificando el uso de materia, energía y las emisiones al entorno, para determinar el impacto que el uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y así evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. Se entiende por una carga ambiental, la cantidad de contaminante que llega al medio o la cantidad de recursos extraídos del mismo.

Las aplicaciones más importantes de esta herramienta son: en análisis de la contribución de las etapas de producción, uso y vertido a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso a la carga ambiental del mismo; la comparación entre productos que tengan la misma fase productiva, materia prima u ofrezcan el mismo uso y la comparación de diferentes opciones para un proceso.

Los estudios de ACV inicialmente fueron desarrollados para analizar productos o materiales. Sin embargo, con el tiempo estos han evolucionado hasta evaluar los impactos ambientales de procesos, como por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales.

Son muchos y muy variados los estudios que se han llevado a cabo. La primera referencia encontrada sobre estudios de ACV aplicados al tratamiento de aguas residuales, data de 1997, cuando Roeleved et al. (1997) utilizó esta metodología para evaluar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales en Holanda. Una de las conclusiones principales de dicha investigación fue

concluir que esta clase de estudios deben aplicarse a nivel regional y no nacional, dadas las diferencias sustanciales del tipo de aguas a tratar.

La mayoría de los estudios que se han realizado están centrados en la evaluación de la explotación de las PTAR's, desde un punto de vista integral y comparativo. Sin embargo, es necesario analizar los estudios de manera separada según la capacidad de las instalaciones, dado que las etapas que forma el tratamiento pueden ser muy diferentes.

Por otro lado el Dr. Santiago Gassó de la UPC en España, puntualizó sobre ciertas consideraciones relevantes del ACV en PTAR's:

- La etapa de construcción es responsable de 25 % al 35 % del potencial de calentamiento global en una PTAR's.
- El funcionamiento de la instalación se considera mucho más relevante para el resto de las categorías.
- El impacto de la etapa demolición/desmantelamiento se ha encontrado que es prácticamente insignificante.

Algunos autores afirman que los impactos del tratamiento de aguas residuales sobre el medio ambiente global se asientan en los siguientes aspectos:

- El consumo de energía es el apartado con mayor impacto ambiental global.
- La descarga del efluente tratado en las PTAR's es la máxima responsable de la eutrofización.
- La aplicación del lodo en el terreno es la mayor responsable de la ecotoxicidad y la acidificación por las emisiones de amonio.



## **ALCANCE**

El tratamiento integral y la disposición final del agua residual como fin para proteger el ambiente contempla el análisis de cuatro aspectos fundamentales: social, económico, ambiental y técnico. En los cuales se basa el alcance de este estudio para analizar el ciclo de vida completo, del proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos.



## LIMITACIONES

El estudio de investigación se delimita en el análisis del ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos. Este análisis es de tipo “*gate to gate*” (de puerta a puerta), desde que el agua residual entra hasta que sale de la planta de tratamiento. Tomando en consideración el consumo de productos químicos, de electricidad, la producción de lodos y su utilización como *compost*, si lo haya, las distintas emisiones al medio producidas por el propio funcionamiento de la PTAR´s, la remoción de carga contaminante y nutrientes, así como el impacto a la sociedad.

Aunque en este análisis queda excluida la fase de construcción de la planta, y la producción y transporte de los reactivos, debido que no se tienen identificados los costos de construcción o producción, los materiales empleados, la energía utilizada, las emisiones al medio y los residuos liberados al ambiente natural, correspondientes a estas actividades, se determinará y tomará en consideración al menos los costos operativos y de mantenimiento de la planta, con el fin de incluirlos en los aspectos económicos a evaluar, y determinar el costo por metro cúbico de agua tratada de la tecnología seleccionada en su momento y que aún se mantiene en operación.



## INTRODUCCIÓN

El proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se puede caracterizar como un proceso industrial: la materia prima es el agua residual (sin costo); el producto final es el agua tratada, producto comercial cuya “venta” tiene que asumir todos los costos de producción (mano de obra, energía, reactivos, mantenimiento, amortización, entre otros) y los subproductos son, principalmente, los residuos sólidos y los lodos generados. El producto final deberá cumplir con los objetivos de calidad marcados por la legislación y ser sostenible con el tiempo.

Un “Proyecto”, según la definición del *Project Management Institute* (PMI, 2008) es un esfuerzo temporal enfocado en crear un producto o servicio único.

De esta forma, parece lógico pensar que este producto o servicio deberá ser lo más sostenible posible, y por tanto utilizarse las herramientas de sostenibilidad disponibles en todo su proceso.

El ACV es una herramienta que contempla la componente medioambiental y, en menor cuantía pero con igual importancia, los aspectos sociales y económicos de manera global. Permite tomar decisiones estratégicas a partir del estudio de la sostenibilidad de los distintos procesos del tratamiento, comparar tecnologías de tratamiento de agua, optimizar procesos y determinar el impacto global del ciclo de vida de la planta de tratamiento.

Es por esto, que en este proyecto se realizará un análisis integral del ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la

ciudad universitaria, con el propósito de estudiar los aspectos técnicos, económicos, sociales y medioambientales, asociados a este tipo de planta de tratamiento de “filtros biológicos o percoladores” e identificar posibles mejoras que eviten o minimicen los efectos adversos al medio ambiente, a la operación y mantenimiento y a la sociedad.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Gestión ambiental y aguas residuales domésticas en Guatemala**

La gestión ambiental debe entenderse como el conjunto de acciones que se pueden ejecutar para evitar un impacto negativo sobre el ambiente, como consecuencia de cualquier actividad del ser humano, es por esto que hacer gestión para mejorar las condiciones ambientales de nuestro entorno no es necesariamente una responsabilidad atada a una profesión como tal ni debería estar sujeta a la legislación, sino que debe nacer de la responsabilidad (ética y moral) de mejorar las mencionadas condiciones ambientales que se tienen, desde diferentes áreas del conocimiento como también de la preocupación personal que puede surgir a causa de una afectación realizada al ambiente (Donado, 2013).

Históricamente el manejo del agua residual ha creado inconvenientes para el desarrollo de los centros poblados, pasando desde utilizar el campo como primer escenario para el saneamiento, la utilización de letrinas gradualmente tecnificadas o de recolectar las aguas a través de canales abiertos para conducir las hacia determinados lugares, y llegando finalmente hasta lo que hoy son los sistemas de alcantarillado.

Todo este desarrollo se ha dado a partir de la gestión de los entes territoriales por mejorar las condiciones de bienestar de las comunidades (Donado, 2013).

Para entender la situación actual entre la generación de aguas residuales en Guatemala y su gestión es necesario tener en cuenta lo siguiente: actualmente la gestión de las aguas residuales en Guatemala está regulada por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, sobre el Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos, planteando mediante el acuerdo gubernativo 110-2016, una reforma al artículo 24 de este mismo (236-2006).

Aunque es cierto que la cobertura en alcantarillado en Guatemala es deficiente como se muestra en la tabla 1, en este momento gracias al artículo 24 exigido por el acuerdo gubernativo 236-2006 se tienen plazos máximos establecidos para el vertido de las aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectados al alcantarillado público. Esto obliga a que bien sea a mediano o largo plazo esta pobre cobertura con que se cuenta actualmente en el servicio de alcantarillado mejore considerablemente, disminuyendo a su vez el impacto negativo sobre el ambiente.

Tabla I. **Cobertura de saneamiento en Guatemala, año 2011**

<b>Cobertura de saneamiento</b>	
<b>Sistema de saneamiento</b>	<b>Total</b>
<b>Alcantarillado</b>	38 %
<b>Letrina y pozo ciego</b>	41 %
<b>Excusado lavable</b>	7 %
<b>Inodoros conectados a fosa séptica</b>	6 %
<b>Ninguna técnica</b>	8 %

Fuente: Gobierno de Guatemala. Política Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento  
Encuesta ENCOVI, 2011. p.12.

En relación con los servicios de saneamiento (tabla I), según la ENCOVI 2011, la cobertura nacional de los sistemas por red de alcantarillado es del 38



% . El resto de la población cubre sus necesidades de saneamiento domiciliario a través de uso de letrina, pozo ciego (41 % de los hogares), excusado lavable (7 % de los hogares) e inodoro conectado a fosa séptica (6 % de los hogares). Entre los departamentos con mayor número de hogares que utilizan letrina o pozo ciego se encuentran en el área rural de Alta Verapaz, Totonicapán, Petén, Quiché, San Marcos, Huehuetenango, Jalapa y Sololá, donde más del 60 % de hogares utiliza este mecanismo para disponer las excretas.

Las descargas de las aguas residuales municipales se han convertido en uno de los problemas ambientales más críticos y más crecientes, si se considera que el incremento poblacional de la mayoría de los centros urbanos y periurbanos medianos y grandes es notable debido a la situación socioeconómica y de orden público del país. Esta situación se refleja en el aumento de las descargas de tipo doméstico e industrial, deteriorando cada vez más el estado de la calidad del recurso. La situación se hace más crítica cuando la corriente tiene un uso definido aguas abajo, pues se alteran las condiciones de calidad del agua requeridas para el abastecimiento de actividades específicas y la vida acuática.

Esta situación hace que la disponibilidad del recurso sea limitada para muchas regiones del país principalmente para consumo humano y recreativo. La sobresaturación de carga orgánica desequilibra los ecosistemas acuáticos y genera condiciones anóxicas (sin oxígeno) de difícil recuperación que limitan la vida de las comunidades acuáticas y generan procesos de eutrofización de cuerpos de agua por sobreabundancia de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Andreoli et al., 2001).

Según lo anterior se esperaría que en Guatemala estuviera en crecimiento la construcción y operación de plantas de tratamiento de agua residual, pero el

panorama es diferente y esta gestión se encuentra bastante retrasada, de acuerdo con una estimación realizada poco exacta, producto de la escasa información en 2015 por el área forestal y ambiental de la Asociación Nacional de Municipalidades (ANAM), apenas existen 150 de 338 municipios que cuentan con planta de tratamiento de aguas residuales, de las cuales muchas de ellas se encuentran con grandes deficiencias técnicas debido a una operación y mantenimiento pobre.

## **1.2. Tratamiento de las aguas residuales**

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, nutrientes y/u otro elemento en específico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con el fin de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará.

El objetivo de tratar un agua residual se logra mediante la integración de operaciones (físicas) y procesos (químicos y biológicos) unitarios, que serán seleccionados en función de las características del agua residual a tratar y de la calidad deseada del agua tratada. Dependiendo de ello es posible generar emisiones gaseosas a la atmósfera, e invariablemente, la producción de material de desecho que puede ser un residuo sólido, como la materia retenida en las rejillas o tamices, o semisólido en forma de lodos.

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, la Ley de la Conservación de la Materia hace que al retirar de alguna forma el material contaminante del agua residual, este solo se transforme o transfiera. Por esta simple razón, siempre se producirán residuos, tales como los lodos, en los

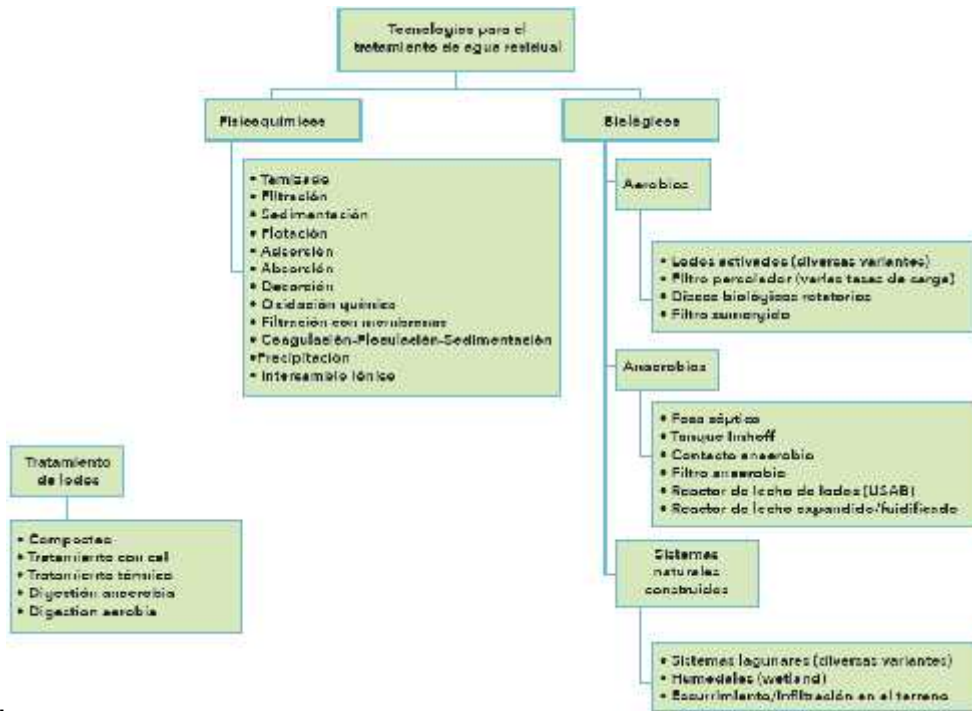
sistemas de tratamiento de aguas residuales, acompañados por la generación de emisiones gaseosas.

Las cantidades y calidad de estos residuos dependerán de las características del agua residual a tratar y evidentemente de la configuración del sistema de tratamiento.

Por otro lado, los requerimientos de insumos, tales como energía eléctrica y reactivos químicos, se darán en función de las tecnologías seleccionadas para integrar el sistema de tratamiento, y por ende, el costo de operación dependerá también de lo mismo.

La oferta tecnológica en el mercado es amplia y se presenta bajo distintos nombres o denominaciones que en ocasiones tiene el carácter de marcas registradas. Sin embargo, invariablemente, sabiendo analizar cualquier tipo de sistema de tratamiento presentado bajo una marca registrada o nombre comercial, se podrá clasificar en algún tipo de proceso de tratamiento, o combinación de ellos (ver figura 1).

Figura 1. Clasificación esquemática de los procesos para el tratamiento las aguas residuales



Fuente: UNAM. Instituto de Ingeniería. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. p. 9.

La persona o grupo interdisciplinario encargado de la selección de una tecnología o sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y hasta sociales, muchas veces en un contexto de mercadotecnia no totalmente veraz. Esto hace que el responsable de la toma de decisiones y su equipo de apoyo deban evaluar varios aspectos.

Una tecnología tenderá a ser sustentable cuando en su concepción y características considere el menor uso de insumos y energía posible y se adapte adecuadamente a las condiciones del medio social y económico que le

rodea; es decir, hacer uso de los recursos e insumos locales en la medida de lo posible y que presente el menor impacto al medio ambiente a través del control de sus residuos y emisiones, preferentemente transformándolos en subproductos susceptibles de aprovechamiento en el entorno. Para esto se han creado herramientas de evaluación y análisis a nivel global que estudian íntegramente el sistema o tecnología de tratamiento que se estará tratando a fondo en esta investigación: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

### **1.3. Normativas internacionales del ACV**

Debido a su complejidad, la metodología de ACV se aplica según una normativa elaborada por la “*International Standards Organization*” (ISO). A continuación se mencionan las normas ISO que regulan el desarrollo de un análisis de ciclo de vida:

- ISO 14040 (2006): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco.
- ISO 14044 (2006): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices.
- ISO/TR 14047 (2012): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar la norma ISO 14044 para impactar las situaciones de evaluación.
- ISO/TS 14048 (2002): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - formato de documentación de datos.
- ISO/TR 14049 (2012): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Ejemplos ilustrativos sobre cómo aplicar la norma ISO 14044 de definición del objetivo y alcance y análisis de inventario.

- ISO/TS 14071 (2014): Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - los procesos de revisión crítica y competencias de los viajeros: requisitos adicionales y directrices a la norma ISO 14044: 2006.

#### **1.4. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV), de acuerdo con la Norma ISO 14040 (ISO, 2006), se define como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” (Inhobe, 2009).

##### **1.4.1. Fases del ACV**

El Análisis de Ciclo de Vida es un proceso en el que se reconocen cuatro fases fundamentales, cuya interrelación (según las normas ISO) se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2. **Estructura de interrelación entre las fases del ACV**



Fuente: Organización Internacional de Normalización. ISO 14040, 2006.

<http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040>. Consulta: julio de 2016.

#### **1.4.1.1. Definición del objetivo y alcance**

En esta primera fase se define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance, de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.

#### **1.4.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida**

Es la fase del ACV en la que se recogen los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de tratamiento, cuantificando la energía y materias primas consumidas; las emisiones a la

atmósfera y a las aguas; los residuos sólidos y cualquier otro vertido al medio que se produzca durante cualquier etapa en el ciclo de vida (Baumann y Tillmann, 2004). El inventario del ciclo de vida incluye los siguientes pasos (Feijoo et al., 2007): definición detallada del sistema estudiado por medio de la construcción de diagramas de flujo para la identificación de corrientes y conexiones entre los subsistemas, recogida de datos y normalización de los mismos, con base en la unidad funcional definida.

#### **1.4.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida**

Es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es trasladado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales. En general; este proceso implica la asociación de datos del inventario con impactos ambientales específicos, tratando de valorar dichos impactos. El nivel de detalle, la elección de impactos evaluados y las metodologías usadas dependen del objetivo y alcance del estudio (ISO, 2006).

Para esta fase la UNE-EN-ISO 14040:2006 establece una serie de pasos o etapas, que se mencionan a continuación:

- Clasificación: supone la agrupación de los datos del inventario según su potencial impacto en las distintas categorías previamente seleccionadas, (Alejandro Gallego et al., 2008).
- Caracterización: implica la aplicación de modelos para obtener un indicador ambiental en cada categoría de impacto, unificando en una única unidad de referencia todas las sustancias clasificadas dentro de



cada categoría mediante el empleo de factores de peso o equivalencia, (Alejandro Gallego et al., 2008).

- Normalización: consiste en la evaluación de la significación del perfil ambiental generado mediante la “adimensionalización” de las categorías y la comparación entre las mismas, (Alejandro Gallego et al., 2008).
- Ponderación: permite determinar, cualitativa o cuantitativamente, la importancia relativa de las distintas categorías de impacto, con la finalidad de obtener un resultado único o índice ambiental, (Alejandro Gallego et al., 2008).

La selección de categorías ambientales, la clasificación y la caracterización son etapas obligatorias, mientras que la normalización y la valoración son etapas opcionales (ISO, 2006).

#### **1.4.1.4. Interpretación de resultados**

Esta última fase del ACV en la que los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) y de la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) son interpretados de acuerdo con el objetivo y alcance, marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones.

### **1.5. Limitaciones del ACV**

A continuación se describen todas las limitaciones del Análisis del Ciclo de Vida.

### **1.5.1. Calidad de los datos**

La situación ideal sería aquella donde todos los datos requeridos para la realización de un ACV estuvieran accesibles y fueran relevantes, fiables y presentados con las unidades de medida adecuadas. Desgraciadamente, esto no es lo que habitualmente ocurre en realidad y normalmente faltan datos, son poco representativos; existen pero no son accesibles. Esto se hace aún más patente en los países en desarrollo, donde la falta de datos de “*background*”<sup>2</sup> obliga a utilizar los presentes en los software comerciales, que en muchas ocasiones no son necesariamente compatibles (por ejemplo, producción eléctrica de otro país), provocando que dichos ACV’s tengan poca fiabilidad en sus resultados (Mungkung et al., 2005).

### **1.5.2. Existencia de diversas metodologías de evaluación del impacto en el ACV**

Cada una define distintos tipos de categorías de impacto, lo que reduce la comparabilidad del ACV e incluso puede provocar que la interpretación de los resultados varíe en función de la metodología empleada. Estas metodologías realizan numerosas asunciones que pueden desvirtuar el resultado final del análisis si no son tenidas en cuenta (Huijbregts et al., 2003). Además, en muchos casos, la base de dichas metodologías no es de fácil acceso para el público en general, lo que reduce su credibilidad.

### **1.5.3. Poca sofisticación de las categorías de impacto**

Diversos autores reclaman un mayor desarrollo en algunas categorías de impacto, de forma que se acerquen cada vez más a la medición del daño real al medio ambiente (mediante la inclusión de factores de transporte, exposición,

entre otros) y que tengan en cuenta la variabilidad temporal y espacial (Potting et al., 2001).

#### **1.5.4. Escasa valoración de la incertidumbre en los ACV's**

Según Huijbregts et al. (2003) pueden distinguirse tres tipos de incertidumbre en un ACV:

- Incertidumbre en los parámetros: causada por los errores en las medidas de los datos de entrada, debido, por ejemplo, a mediciones imprecisas, estimaciones o asunciones.
- Incertidumbre en los escenarios: los resultados de un ACV pueden variar en función de las decisiones que se tomen a la hora de definir el sistema objeto de estudio (selección de una determinada unidad funcional, límites del sistema, entre otros). Los resultados pueden variar, por ejemplo, en función de los distintos escenarios de tratamiento de residuos que se escojan.
- Incertidumbre en los modelos: asociada directamente al hecho de que un modelo será siempre una aproximación de la realidad pero no la realidad en sí misma y por lo tanto no es posible que se incluyan siempre todos los aspectos potencialmente relevantes del mundo real en la estructura de modelado del ACV. Así, un ejemplo sería la falta de diferenciación espacial en la evaluación de determinadas categorías de impacto.

Si no se tienen en cuenta estas incertidumbres, el ACV puede derivar en la toma de decisiones incorrectas (Sonnemann et al., 2003). Por ejemplo, puede

descubrirse que la aparente diferencia entre dos productos sea estadísticamente insignificante al calcular las incertidumbres.

## **2. UNIVERSO DEL TRABAJO**

### **2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC**

La planta de tratamiento fue diseñada por el Ing. Arturo Pazos en 1989, como un sistema de tratamiento biológico de un filtro percolador de tres etapas en serie, con una capacidad para 50,000 estudiantes. Fue construida por la Compañía Constructora de Obras Civiles (COCISA) en 1990 (Ramírez, 2012).

Para el curso universitario del 2017 se cuenta con una matrícula de 83,151 estudiantes y 4,562 personas entre funcionarios administrativos, docentes, investigadores y temporales. Por lo cual, la planta de tratamiento tiene la capacidad de tratar las aguas residuales que generan de manera variable e irregular las 87,713 personas. (Oficina de Registro y Estadística-USAC, 2017).

El sitio seleccionado para la construcción es un terreno de topografía irregular, que permitió diseñar un proceso de tratamiento donde la circulación del agua residual a través de las diferentes unidades se realizara por medio de la fuerza de gravedad.

La siguiente fotografía muestra la entrada de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, Guatemala.

Figura 3. Acceso a la PTAR de la USAC



Fuente: planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

## 2.2. Ubicación

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se ubica dentro de la Ciudad Universitaria, en la zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Esta colinda al norte, sur y este con los terrenos de la granja experimental de la Ciudad Universitaria y al oeste, con la colonia Monte María y una quebrada al medio, donde se descargan las aguas tratadas de la planta.

Figura 4. Ubicación PTAR-USAC



Fuente: Google Earth. Planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

### 2.3. Localización

Las coordenadas geográficas de la planta de tratamiento son las siguientes:

- Latitud: 14° 34 43.70"
- Longitud: 90° 33 34.75"
- Altitud: 1 456 m.s.n.m.

Figura 5. Vista aérea de la localización de la PTAR-USAC



Fuente: Google Earth. Planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

## 2.4. Descripción de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento consta de una tecnología de filtros percoladores, la cual se basa en un proceso físico, biológico y aerobio. Las unidades que componen esta planta de tratamiento son:

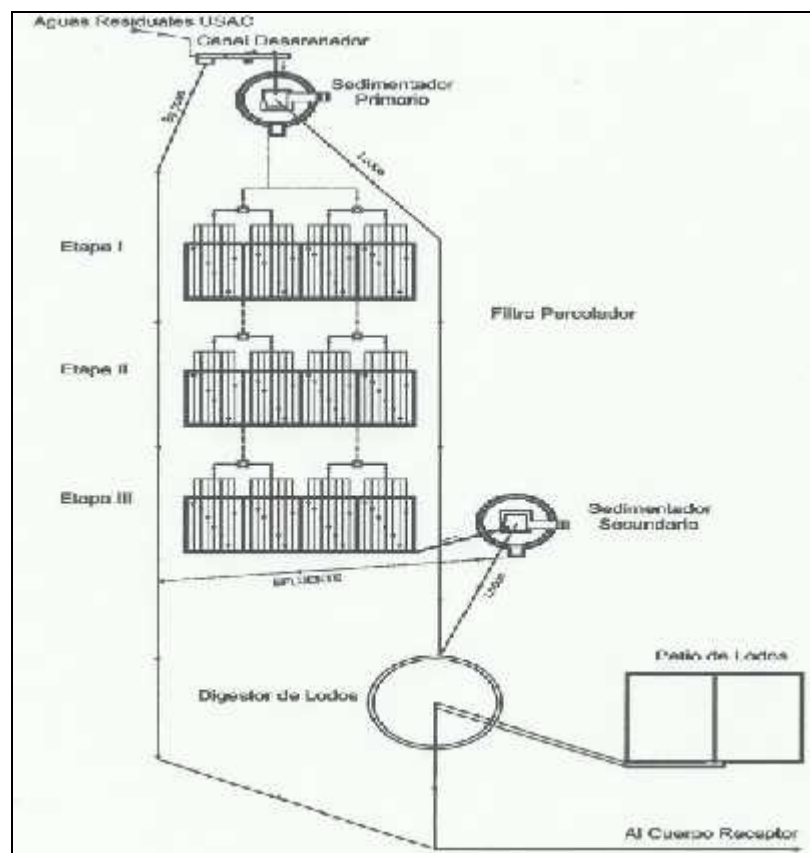
- Cámara de ingreso con su respectivo derivador de demasías “*By pass*”
- Rejillas separadoras
- Canal desarenador
- Sedimentador primario
- Filtro percolador (de tres etapas en serie)
- Sedimentador secundario
- Digestor de lodos y patio de secado



Previo a estas unidades de la PTAR se encuentra la red de alcantarillado interna de la universidad, que logra captar, canalizar y conducir todas las aguas hasta la cámara de ingreso de la planta de tratamiento.

En la figura que se incluye a continuación se muestra gráficamente la distribución espacial de las diferentes unidades de tratamiento existentes en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Figura 6. **Esquema de la PTAR-USAC**



Fuente: RAUDALES, Rommel. *Investigación de la eficiencia de las etapas en serie del filtro percolador de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos.*

### 2.4.1. Pretratamiento

Dentro del pretratamiento se encuentran la cámara de ingreso con su respectivo derivador de demasías “*By pass*”, la rejilla separadora y el canal desarenador. En estas tres unidades ocurren procesos meramente físicos de separación de sólidos gruesos, material inerte y regulación de caudal. Producto de las aguas crudas entran a estas unidades; el olor del agua en esta zona es fácilmente perceptible.

- Cámara de ingreso con su respectivo derivador de demasías “*By pass*”: esta estructura regula y ecualiza la cantidad de agua que ingresa a la planta, producto que el sistema de alcantarillado es combinado con el caudal aumenta con las lluvias. También cumple la función de desfogue para cuando se requiere realizar actividades de mantenimiento en las estructuras de tratamiento o cuando el caudal de ingreso es mayor al caudal máximo de diseño para el cual la planta puede operar.
- Rejilla separadora: esta estructura retiene los sólidos de gran tamaño, flotantes y material inerte. Es importante mencionar que esta rejilla se instala con una inclinación de 60° con el propósito de evitar su obstrucción y facilitar la remoción manual del material retenido. Está construida de varilla de ¾” y un espaciamiento entre barras de 1 cm.
- Canal desarenador: este está dispuesto para precipitar los sólidos de mayor densidad, tal como las arenas. Las dimensiones de la sección útil corresponden a 9 metros de longitud y 40 cm de ancho.
- Fosa: en ella se colocan los sólidos que son retirados de la rejilla y del canal desarenador. Está ubicado al costado derecho del canal

desarenador y posee un diámetro de 1.5 m y una profundidad aproximada de 3 m.

Figura 7. **Vista general de las unidades que componen el pretratamiento de la PTAR (cámara de ingreso, rejillas, canal desarenador y fosa)**



Fuente: Planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

#### **2.4.2. Tratamiento primario**

Dentro del tratamiento primario se encuentra en sedimentador primario, en esta unidad de tratamiento se da un proceso meramente físico:

- Sedimentador primario: esta estructura está diseñada y construida para remover los sólidos que no son retenidos en las etapas previas. Es una

estructura de concreto reforzado en forma de cono truncado, a este tipo de sedimentadores se le llama sedimentador de tipo “*dortmund*”.

- El caudal proveniente del desarenador ingresa hasta el centro del sedimentador por medio de una tubería de PVC de 8” de diámetro, la cual vierte el agua residual por la parte superior del sedimentador. Dispone de una pantalla de forma cuadrada y de perímetro cerrado en el centro de la estructura que permite forzar el flujo descendente del agua residual y que además retiene natas y material flotantes, que son removidos manualmente y trasladados a la fosa (Ramírez, 2012).
- En el anillo exterior de la estructura existe un vertedero de decantación, que permite que solamente el agua residual sobrenadante sea decantada y recolectada en un canal perimetral que la conduce al filtro percolador (Ramírez, 2012).
- La evacuación de los lodos acumulado en el sedimentador se realiza aproximadamente cada seis meses o cuando se observan emanaciones de gases en la superficies (Ramírez, 2012).
- Las dimensiones de esta estructura son las siguientes: 10,66 m de diámetro mayor, 0,50 m de diámetro menor y 9,30 m de profundidad, cubiendo un volumen de 290 m<sup>3</sup>.

### **2.4.3. Tratamiento secundario**

Dentro del tratamiento secundario se encuentran los filtros percoladores en serie y el sedimentador secundario.

En este tratamiento se dan varios procesos; cuando se habla de los filtros percoladores se está haciendo referencia a un proceso biológico, mientras que en el sedimentador secundario se da un tratamiento físico, igual al proceso del sedimentador primario antes mencionado.

- Filtro percolador: está compuesto por tres etapas conectadas en serie, de iguales dimensiones constructivas, y medio filtrante de roca volcánica porosa. Cada una de las etapas esta subdivida en 4 secciones, con un dimensionamiento útil de 3,80 x 6.20 x 4.0 m. El filtro percolador posee una superficie de 94,24 m<sup>2</sup> y un volumen de 1130.88 m<sup>3</sup> (Ramírez, 2012). El sistema de distribución del agua sobre los lechos filtrantes en cada una de las etapas del filtro percolador es mediante un sistema *Manifold* de 7 tuberías de PVC o HG. El medio filtrante (piedra volcánica) es soportado por un sistema de fondo falso, el cual consta de 24 tuberías perforadas de sección parcial, que permite tanto la ventilación del medio filtrante como la recolección del agua percolada. El área de ventilación es de aproximadamente 3,4 m<sup>2</sup> y la canaleta de recolección tiene pendiente del 1 %, con dos salidas (Ramírez, 2012).

Figura 8. **Sistema de distribución del agua residual sobre los filtros percoladores**



Fuente: Planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

Figura 9. **Sistema de aireación y recolección del agua residual percolada**



Fuente: planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

- **Sedimentador secundario:** el objeto de este sedimentador es retener toda la biomasa y sólidos que se han desprendido o que han superado las etapas del filtro percolador. El diseño de este sedimentador es igual al del sedimentado primario, por lo que las dimensiones son las mismas. En relación con los lodos sedimentados, estos son trasladados al digester de lodos. En esta altura del proceso, el agua tratada se nota cristalina, sin material flotante, pocos sólidos visibles y el olor generalmente es imperceptible. Seguido de esta etapa el agua es descargada al cuerpo receptor, pese a que podría ser reusada en diversas actividades.

Figura 10. **Sedimentador secundario**



Fuente: planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.

#### **2.4.4. Digestor de lodos y patio de secado**

Esta estructura está construida en concreto reforzado, tiene una geometría circular y una forma de cono truncado. Posee un diámetro mayor de 17 m, un diámetro menor de 0,50 m y una altura de 14 m. Los sólidos producidos en los sedimentadores primario y secundario son conducidos por una tubería y tratados en este digestor de lodos, donde se lleva a cabo un proceso anaeróbico, acompañado de licuefacción con la consiguientes formación de gases de efecto invernadero y estabilización de los mismos.

Una vez los lodos se estabilizan, son trasladados al patio de secado, el cual se conforma de dos losas de concreto con un área de 336 m<sup>2</sup> para su secado y deshidratado por la acción de los rayos del sol y filtración del agua en



el subsuelo. Cuando los lodos se encuentran deshidratados son extraídos y ocasionalmente aprovechados como abono orgánico.

**Figura 11. Digestor de lodos y patio de secado**



Fuente: planta de tratamiento de aguas residuales, USAC.



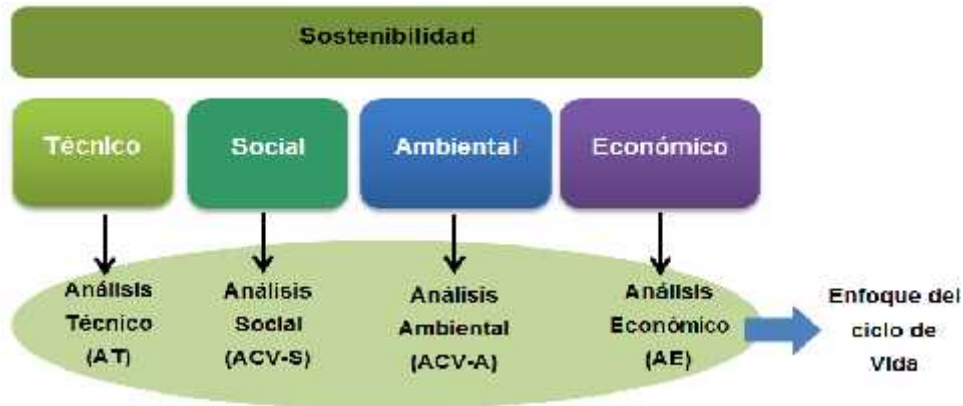
### **3. METODOLOGÍA**

La metodología empleada en la investigación se basa en el método del análisis del ciclo de vida, modificándose para incluir los aspectos técnicos, económicos y sociales. Como se ha explicado anteriormente el ACV se ha enfocado principalmente en los aspectos ambientales, y para el caso de las aguas residuales su enfoque primordial es en la etapa del tratamiento (construcción, operación y mantenimiento). La investigación se realiza de modo integral, identificando los pros y contras para la sostenibilidad de los procesos de tratamiento, existentes y futuros, de modo que se puede aumentar la eficiencia de los procesos de tratamiento, mejorar la calidad de los cuerpos receptores y disminuir las enfermedades provocadas por la contaminación del agua.

Esta metodología se basa en identificar la distribución de las cargas medioambientales a lo largo de la vida útil del proceso de tratamiento, de manera integral con los componentes técnicos, económicos y sociales, enfocada en identificar y cuantificar el uso de materia, recursos, energía, las emisiones al entorno, aspectos sociales, técnicos y económicos que permitan determinar el impacto que el tratamiento y esos vertidos producen, y así evaluar, sopesar los aspectos incluidos y llevar a la práctica estrategias de mejora no solo ambientales, sino integrales en el tratamiento de las aguas residuales.

A continuación se presenta esquemáticamente la metodología del ACV modificado y se describen las diferentes metodologías propuestas para cada uno de estos componentes del ciclo de vida.

Figura 12. **Análisis del ciclo de vida modificado**



Fuente: FERREIRA, B. (2009). *Life Cycle Cost (LCC) and Social Life Cycle Assessment (SLCA)*, modificado por POCASANGRE, A. (2014). p. 17.

### 3.1. **Análisis del ciclo de vida social**

El análisis del ciclo de vida social es uno de los componentes fundamentales para evaluar los impactos sociales que pueden existir en una planta de tratamiento de aguas residuales. El procedimiento de este análisis se basa en los cuatro ítems siguientes:

Figura 13. **Diagrama de la metodología del análisis del ciclo de vida social**



Fuente: elaboración propia.

### **3.1.1. Definición del objetivo y alcance**

A continuación se describe el objetivo y el alcance:

- **Objetivo:** determinar y analizar los impactos sociales asociados a la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de acuerdo con las entradas y salidas del proceso.
- **Alcance:** esta evaluación se limita a la operación de la planta de tratamiento de filtros percoladores. Toma en consideración exclusivamente los impactos sociales asociados a las entradas/salidas del proceso de tratamiento, es decir, aquellos impactos que se generen debido al proceso de tratamiento en la planta y las repercusiones que puede generar el efluente.

### **3.1.2. Análisis de inventario**

El desarrollo de los criterios de evaluación tiene como propósito determinar un conjunto de principios que sirven para seleccionar las categorías o grupos de interés involucrados y los indicadores de desempeño de cada categoría evaluada.

#### **3.1.2.1. Desarrollo de criterios de evaluación**

Para establecer los grupos de interés y los indicadores, así como la propuesta metodológica que presenta la fuente primaria de este trabajo, se consideraron las directrices de la UNEP (2009). Los grupos de interés y los indicadores de desempeño seleccionados tomaron en consideración los factores principales que pueden afectar la gestión de una PTAR's. Se

determinaron 4 categorías o grupos de interés de involucrados y 21 indicadores de desempeño, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla II. **Categorías de estudio**

No.	Categorías o grupos de interés
1	Trabajadores
2	Usuarios
3	Consumidores
4	Proveedores

Fuente: elaboración propia.

- Los trabajadores se refieren a todas aquellas personas que trabajan de forma directa o indirecta en la planta de tratamiento, pero que tienen que ver algunos temas o aspectos de la misma.
- Los usuarios son los vecinos de la colonia (en este caso, de la PTAR de la USAC) que reciben el servicio de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Los consumidores son las personas que aprovechan o utilizan las aguas residuales ya tratadas, el lodo digerido o el biogás producido, para diferentes usos.
- Los proveedores son todos aquellos que le proporcionan implementos, suministros, herramienta, equipo, materiales, entre otras, a la planta de tratamiento de aguas residuales.

Para evaluar dichas categorías es ineludible determinar ciertos indicadores de desempeño. Para el caso en estudio se definió una cantidad de indicadores por categoría que tienen una estrecha relación con la gestión del proceso de la planta de tratamiento. En la siguiente tabla se muestra la cantidad de indicadores asignados por categoría y su título.

Tabla III. **Número de grupos de interés e indicadores correspondientes**

No.	Grupos de interés	Indicadores de desempeño
1	Trabajadores	8
2	Usuarios	5
3	Consumidores	3
4	Proveedores	3
	<b>Total</b>	<b>19</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Categorías e indicadores de interés**

No.	Categorías de interés	No.	Indicadores
1	Trabajadores	1,1	Horas de trabajo
		1,2	Salud y seguridad
		1,3	Libertad de asociación colectiva y beneficios sociales
		1,4	Salario justo
		1,5	Disponibilidad de documentación de la PTAR
		1,6	Capacitación
		1,7	Programa de monitoreo
		1,8	Materiales y equipo
2	Usuarios	2,1	Seguridad y condiciones de vida saludable
		2,2	Compromiso de la comunidad
		2,3	Aceptación social
		2,4	Empleo local
		2,5	Compromiso público con temas de sustentabilidad
3	Consumidores	3,1	Satisfacción del consumidor
		3,2	Mecanismo de retroalimentación
		3,3	Calidad del efluente
4	Proveedores	4,1	Competencia justa
		4,2	Relaciones con los proveedores
		3,3	Promoción de la responsabilidad social.

Fuente: elaboración propia, con base en lo propuesto por la UNEP, 2009.

### 3.1.2.2. Recopilación de datos

Este proceso consiste en obtener los datos y transformarlos en información útil para el análisis social. Es muy importante que los datos obtenidos sean validados. Para esto, la recopilación y validación de los datos se efectuó a través de entrevistas con el apoyo de cuestionarios, y evaluaciones de visitas a campo. Se realizaron diversos cuestionarios de acuerdo con el entrevistado y al grupo de interés. En las siguientes tablas, se muestra a quiénes se entrevistó, y la cantidad y tipo de cuestionario que se utilizó:

Tabla V. **Número de entrevistados y tipo de cuestionario utilizado**

Entrevistas	Cantidad	Tipo de cuestionario	Total
<b>Operadores</b>	3	Trabajadores	3
<b>Jefe de la PTAR</b>	1	General	4
<b>Director de la granja</b>	1	General	
<b>Unidad Técnica</b>	1	General	
<b>Investigador (observación en campo)</b>	1	General	
<b>Vecinos de la planta USAC</b>	7	Usuarios	11
<b>Estudiantes de la USAC</b>	4	Usuarios	

Fuente: elaboración propia, con base en lo propuesto por la UNEP, 2009.

Tabla VI. **Cantidad de preguntas por categoría**

No.	Cuestionarios	Descripción	Preguntas
1	Trabajadores	Operadores	45
		Validación de datos	10
		Total	55
2	Usuarios	Vecinos	21
		Estudiantes de la USAC	
		Validación de datos	5
		Total	26



Continuación de la tabla VI.

3	Consumidores	No aplica porque no se reutiliza el agua residual tratada. Pero las preguntas pueden dar información sobre los usuarios para validar datos.
4	Proveedores	Aunque no existen proveedores frecuentes, se le realizó una ligera encuesta al administrador de la PTAR, y también se tomaron en consideración las políticas de la USAC en los temas de contrataciones y selección de proveedores.

Fuente: UNEP, 2009, modificado por Alejandro Rojas Rodríguez, 2017.

En los anexos se presentan las preguntas de los cuestionarios utilizados para entrevistar a los trabajadores y usuarios, así como el resultado final de cada indicador, categoría de interés y resumen de las mismas.

No se realizaron cuestionarios para la categoría de consumidores, ya que no se reutiliza el agua tratada ni el lodo digerido de la planta de tratamiento. Para la categoría de proveedores, como se mencionó anteriormente en tabla VI, se realizó una ligera encuesta al administrador de la planta y también se tomaron en consideración las políticas de la USAC para el tema de contrataciones y selección de proveedores; esto debido a que para la planta de la universidad no existen proveedores frecuentes, ni equipo mecanizado y/o productos químicos necesarios para la operación de la planta como tal.

### **3.1.3. Evaluación de impactos**

De acuerdo con la propuesta metodológica, se utilizan los siguientes criterios de ponderación.

Tabla VII. **Criterios de ponderación para la evaluación de impactos sociales**

Criterios de ponderación	
Nivel	Descripción
0	Se asigna cuando <u>no existen datos reportados</u> .
1	<u>Rendimiento muy pobre</u> , la organización opera en un contexto desfavorable (bajo riesgo físico – psicológico o de seguridad, o violación a los derechos humanos).
2	<u>Rendimiento bajo</u> , la organización no cumple con el requisito básico.
3	Rendimiento medio, actitud aceptable.
4	<u>Excelente rendimiento</u> , se le asigna a una organización que tiene un comportamiento proactivo en los requisitos básicos. El rendimiento va más allá de los estándares mínimos.

Fuente: elaboración propia, con información obtenida de UNEP.

El propósito de los criterios de ponderación se fundamenta en asignar un valor numérico a los indicadores de desempeño determinados.

Una vez realizada la recopilación de datos y determinados los criterios de ponderación de los indicadores, es necesario seleccionar y transformar la información recabada, para continuar con la interpretación de resultados.

Con los siguientes pasos pueden determinarse las condiciones en las que se encuentra la PTAR, según sus grupos de interés e indicadores:

- Ponderación de datos para cada uno de los diferentes cuestionarios establecidos
- Promedio de datos por indicador
- Promedio de indicadores por categoría
- Resumen de categorías

Ponderación de datos para cada uno de los diferentes cuestionarios establecidos: con la información obtenida de los distintos cuestionarios (personas entrevistadas, visitas a campo y cantidad de los mismos), se asigna una ponderación a cada dato (pregunta). En la siguiente tabla se muestra un ejemplo. En los anexos se incluye de manera completa la ponderación de datos para cada uno de los diferentes cuestionarios.

Tabla VIII. **Ejemplo de ponderación de cada pregunta, según su categoría y cuestionario**

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	Trabajadores					
1,1	Horas de trabajo					
a	¿Cuál es su horario de trabajo?					
b	¿La planta funciona las 24 horas o se desvía el caudal en algún momento (noche)?					
c	¿Trabajan horas extras?					
d	¿En emergencias por el clima o algún otro motivo, trabajan horas extras, fines de semana, vacaciones?					
e	¿Existe personal que puede cubrir enfermedades, emergencias, vacaciones, etc.?					
f	¿Existe personal para trabajos de mantenimiento?					

Fuente: elaboración propia, con información modificada de la UNEP.

Promedio de datos por indicador: después de asignarle una ponderación a cada dato (pregunta), se determina un promedio de todas las preguntas, para llegar a determinar la ponderación del indicador, como se puede apreciar en el siguiente ejemplo:

Tabla IX. Ejemplo de ponderación de preguntas por indicador

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	<b>Trabajadores</b>					
1,1	<b>Horas de trabajo</b>					
a	¿Cuál es su horario de trabajo?					
b	¿La planta funciona las 24 horas o se desvía el caudal en algún momento (noche)?					
c	¿Trabajan horas extras?					
d	¿En emergencias por el clima o algún otro motivo, trabajan horas extras, fines de semana, vacaciones?					
e	¿Existe personal que puede cubrir enfermedades, emergencias, vacaciones, etc.?					
f	¿Existe personal para trabajos de mantenimiento?					
<b>Conclusión</b>						<b>Excelente</b>

Fuente: elaboración propia, con información modificada de la UNEP.

Promedio de indicadores por categoría: después de haber determinado la ponderación de cada indicador, se realiza un promedio de los indicadores para establecer la ponderación de cada categoría o grupo de interés estudiado (trabajadores, usuarios, entre otros). En este caso se ejemplifica en la siguiente tabla con la categoría de “Trabajadores”.

En los anexos se encuentra completa la ponderación de los indicadores para todas las categorías.

Tabla X. **Ejemplo de ponderación de promedio de indicadores por categoría**

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>1</b>	<b>Trabajadores</b>					
1,1	Horas de trabajo					
1,2	Salud y Seguridad					
1,3	Libertad de asociación colectiva y beneficios sociales					
1,4	Salario Justo					
1,5	Disponibilidad de documentación de la PTAR					
1,6	Capacitación					
1,7	Programa de Monitoreo					
1,8	Materiales y Equipo					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				

Fuente: elaboración propia, con información modificada de la UNEP.

Resumen de categorías: luego de determinar la ponderación de cada categoría o grupo de interés, se puede conocer cómo se encuentra la PTAR de la ciudad universitaria, de acuerdo con dichos grupos o categorías.

Tabla XI. **Ponderación final según resultados de las categorías**

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	Trabajadores					
2	Usuarios					
3	Consumidores					
4	Proveedores					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				

Fuente: elaboración propia, con información modificada de UNEP.

En los anexos se adjuntan los cuestionarios, las ponderaciones de los datos (preguntas) de los indicadores, categorías y análisis del ciclo de vida social final, donde resumen todo en un resultado único.

### **3.2. Análisis económico**

A continuación se hace la descripción del análisis económico efectuado, para determinar el costo de inversión y operación.

#### **3.2.1. Definición del objetivo y el alcance**

En relación con el tratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se determinó el objetivo y alcance.

- **Objetivo:** determinar el costo de inversión, y operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en función de un valor de monto por metro cúbico tratado.
- **Alcance:** la evaluación se enfoca en la determinación de los costos de inversión, operación y mantenimiento, relacionados con el proceso de tratamiento del agua dentro de la planta, desde que entra hasta que sale de la misma, es decir que toma en consideración los recursos convencionales, tales como el uso de energía eléctrica, servicios de mantenimiento preventivo y correctivo para equipos e infraestructura, operadores y supervisores, productos químicos y análisis de laboratorio.

Unidad funcional: el principal objetivo de una PTAR es tratar el afluente que ingresa a la misma, de manera que se puedan reducir las altas concentraciones de carga orgánica presentes en el agua a los menores costos de operación y mantenimiento. Siempre velando por el bienestar integral del medio ambiente. Por tanto, para este estudio, la unidad funcional por elección es el monto en quetzales por metro cúbico tratado.

### **3.2.2. Estudio económico**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales deben operar a un costo aceptable y sostenible para la comunidad beneficiada. Este costo debe ser compatible integralmente con el servicio y eficiencia que proporciona la planta de tratamiento, ya sea para mejorar el ambiente, preservar la salud pública y la calidad del cuerpo receptor, como proveer un recurso susceptible de reutilización. De acuerdo con el alcance, para realizar el estudio económico se requiere determinar no solo los costos de inversión, sino los costos operativos y de mantenimiento.

- Costos de inversión: se obtuvo el costo de inversión de la planta de tratamiento del año 1989 de la documentación archivada en la División de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos. Esta planta de tratamiento fue construida por la empresa COCISA (Compañía Constructora de Obras Civiles S. A.). Una vez hallado el costo de inversión de 1989, se procedió por medio de las relaciones para los flujos de efectivo discretos con composición de final de periodo, a pasarlo a valor presente (2017). Para esto se utilizó la siguiente fórmula:

$$(F/P, i, n) = (1 + i)^n$$

$$F = P(F/P, i, n)$$

Donde:

F: valor o cantidad de dinero en un tiempo futuro (en este caso valor de interés para el 2017).

P: valor o cantidad de dinero en un momento denotado como presente o tiempo 0, (en este caso valor de 1989).

i: tasa de interés o tasa de retorno por periodo.

n: número de periodos de interés (años, meses, días).

Tabla XII. **Costo de inversión PTAR-USAC**

Costo de inversión			
No.	Ítem	Costo (1989)	Costo (2017)
1	Inversión inicial	Q 650 137,00*	Q 7 701 565,71*
<b>*Sin sobrecostos</b>			

Fuente: elaboración propia.

La tasa de interés utilizada para calcular el valor presente se obtuvo del promedio del porcentaje de inflación de 1989 a 2017. Esta información se presenta en la siguiente tabla.



Tabla XIII. Ritmo inflacionario desde 1989 hasta marzo del 2017

<b>INFLACIÓN</b>	
<b>Años 1989 a marzo 2017)</b>	
<b>- Porcentajes -</b>	
<b>AÑOS</b>	<b>RITMO INFLACIONARIO</b>
1989	20,17 %
1990	59,81 %
1991	10,03 %
1992	14,22 %
1993	11,63 %
1994	11,60 %
1995	8,62 %
1996	10,85 %
1997	7,12 %
1998	7,48 %
1999	4,92 %
2000	5,09 %
2001	8,91 %
2002	6,33 %
2003	5,85 %
2004	9,23 %
2005	8,57 %
2006	5,79 %
2007	8,75 %
2008	9,40 %
2009	-0,28 %
2010	5,39 %
2011	6,20 %
2012	3,45 %
2013	4,39 %
2014	2,95 %
2015	3,07 %
2016	4,23 %
2017	3,90 %
<b>Promedio</b>	<b>9,23 %</b>

Fuente: Instituto Nacional de Estadística -INE-, 2017.

El costo de adquisición del sitio donde se construyó la planta no se ha incluido, ya que estos son muy específicos del lugar y no se tiene un dato probable ni verídico del valor aproximado.

- Costos operativos y de mantenimiento: los costos operativos son todos aquellos en que se incurre para mantener y operar una PTAR, y contempla los siguientes elementos:
  - Personal (operador y supervisor).
  - Productos químicos (en este caso quedan excluidos debido que la tecnología de filtropercoladores utilizada no aplica ningún tipo de producto químico).
  - Energía eléctrica (para este estudio también queda excluido, ya que el proceso de tratamiento y recorrido del fluido es meramente gravitacional).
  - Laboratorios (se realizan sin ningún costo en el laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria Dr. Alba Tabarini Molina, de la Universidad de San Carlos, por los estudiantes de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos).
  - Costo de disposición de lodos.
  - Mantenimiento de equipos e infraestructura.

Tabla XIV. **Costos anuales de operación y mantenimiento de la PTAR-USAC**

<b>Costos operativos y de mantenimiento anuales</b>			
<b>No.</b>	<b>Ítem</b>		<b>Costo</b>
1	Sueldos personal	Q	315 000,00
2	Equipo y herramienta	Q	8 500,00
3	Energía eléctrica	Q	-
4	Extracción de lodos	Q	30 000,00
5	Combustible	Q	500,00
6	Laboratorios	Q	-
<b>Total por año</b>		<b>Q</b>	<b>354 000,00</b>

Fuente: elaboración propia.

Estos costos fueron determinados y obtenidos por la División de Servicios Generales, específicamente por el departamento “Proyectos de Urbanización Ciudad Universitaria y Plan General de Remodelaciones”.

Tabla XV. **Costo total mensual por operación y mantenimiento**

<b>Costos mensuales de operación y mantenimiento, Recuperación de inversión</b>			
<b>No.</b>	<b>Ítem</b>		<b>Costos</b>
1	Operativos mensuales	Q	29 500,00
2	Recuperación inversión inicial	Q	5 461,69
<b>Total por mes</b>		<b>Q</b>	<b>34 961,69</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Costo unitario mensual por metro cúbico tratado**

Costo mensual por m <sup>3</sup> tratado		
No.	ítem	Costo
1	Metro cúbicos tratados al mes	24 105,60 m <sup>3</sup> /mes
	<b>Costo unitario</b>	<b>Q 1,45<sup>1</sup></b>

Fuente: elaboración propia.

El monto por metro cúbico tratado es obtenido tomando en consideración el caudal medio (9 l/s) para el cual fue diseñada la planta de tratamiento. Este caudal promedio se obtiene de la documentación archivada en la División de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Si se toma el caudal medio de la última medición de caudal realizada, 3,89 l/s, daría un costo unitario de Q 3,36 por metro cúbico tratado.

Tabla XVII. **Área por metros cúbicos tratados al mes**

No.	Área por m <sup>3</sup> tratado al mes	
1	Metros cuadrados	5683,29 m <sup>2</sup>
2	Metro cúbicos tratados al mes	24105,60 m <sup>3</sup> /mes
	<b>Área</b>	<b>0,24 m<sup>2</sup></b>

Fuente: elaboración propia.

El área total (5 683,29 m<sup>2</sup>) que se tomó para la estimación, es únicamente el cuadrante donde se encuentran todas las unidades de tratamiento que componen el sistema de tratamiento de la planta (ver anexo, “planos de la PTAR de la USAC”).

<sup>1</sup> Tipo de cambio de referencia vigente al miércoles 31 de mayo de 2017. Q 7.35264.

Para hallar el área por metro cúbico tratado (0,24 m<sup>2</sup>) se tomó en consideración el caudal medio (9 l/s) para el cual fue diseñada la planta de tratamiento. Este caudal promedio se obtuvo de la documentación que contiene archivada la División de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Si se toma el caudal medio de la última medición de caudal realizada, 3,89 l/s, daría un área de 0,55 m<sup>2</sup> por metro cúbico tratado.

### 3.3. Análisis del ciclo de vida ambiental

El análisis del ciclo de vida es una herramienta de sostenibilidad en la gestión integral de las aguas residuales, y se basa en la norma ISO 14040 e ISO 14044; como se explicó anteriormente, este análisis está basado en cuatro fases: la definición del objetivo y alcance, análisis del inventario, evaluación de impactos y la interpretación de los resultados.

Figura 14. **Diagrama de la metodología del análisis del ciclo de vida ambiental**



Fuente: elaboración propia.

Es importante considerar y determinar la unidad funcional que se va a utilizar, así como los límites del sistema, para ajustar de mejor manera la interpretación de los resultados. Los resultados del análisis se correlacionan

con los otros componentes (económico, social y técnico) de la evaluación de sostenibilidad.

### **3.3.1. Definición del objetivo y alcance**

- Objetivo: medir el impacto ambiental generado en el tratamiento de las aguas residuales de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de acuerdo con las entradas y salidas del proceso; de manera que se puedan determinar estrategias para la reducción de los mismos.
- Alcance: la evaluación del proceso toma en cuenta únicamente las entradas/salidas del proceso de tratamiento, es por esto que se le denomina de tipo “*gate to gate*” (de puerta a puerta), es decir, se analiza el impacto ambiental desde la entrada de las aguas residuales en la planta de tratamiento hasta su salida.

Unidad funcional: la principal función de una PTAR es el tratamiento de un afluente para reducir la carga orgánica, de nutrientes y sólidos en suspensión, con el objetivo de alcanzar valores adecuados antes de su vertido a la naturaleza. Dado esto, para este estudio la unidad funcional por elección es el metro cúbico aforado en el afluente.

Sistemas y subsistemas: la PTAR de la Universidad de San Carlos, bajo la tecnología de filtros percoladores como su proceso biológico principal, ha sido dividida en varios subsistemas: pretratamiento y tratamiento primario (subsistema 1), tratamiento secundario (subsistema 2), tratamiento de lodos (subsistema 3), y transporte y uso de lodos (subsistema 4).

Límites del sistema: variedad de estudios relativos al tratamiento de aguas residuales han demostrado que el impacto de la fase de construcción es bastante menor que el de la fase de operación. Además, teniendo en cuenta que se desconocen los impactos medioambientales generados en la etapa de construcción, se vuelven un poco inciertas la estimación y cuantificación de estos impactos. Estas dos razones justifican que se hayan descartado los impactos asociados a la fase de construcción y que el análisis se centre en la fase de operación.

En lo que concierne a los impactos de la recolección, canalización y conducción de las aguas residuales hacia la PTAR, estas actividades se han dejado fuera de los límites del sistema, ya que no se ven afectados por el funcionamiento de la planta de tratamiento. Por tanto, el punto de inicio del sistema es aquel donde se produce la entrada de aguas residuales en la PTAR y concluye en el vertido de las aguas ya tratadas al cauce receptor, o su valorización para un eventual reuso en diversas actividades, en la aplicación-utilización de los lodos generados, y el aprovechamiento del biogás generado en el digestor anaerobio.

Parámetros tecnológicos y de evaluación:

- Tecnológico: el sistema de tratamiento analizado consta de la tecnología de filtros percoladores; se caracteriza por ser un proceso físico y biológico, bajo un proceso aerobio que se enfoca en la remoción de materia orgánica, DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) de un caudal determinado, es decir, su capacidad de eliminación de nutrientes es mínima o nula.

- Evaluación: las categorías de impacto seleccionadas y los indicadores (la representación cuantificable de una categoría de impacto del ACV) de categorías para reflejar los impactos ambientales relacionados con el sistema tecnológico bajo estudio se presentan a continuación:
  - Agotamiento de los recursos abióticos<sup>2</sup>
    - Energía
  - Cambio climático<sup>3</sup>
    - Metano ( $\text{CH}_4$ )
  - Eutrofización
    - Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )
    - Fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ).
    - Demanda química de oxígeno (DQO)
  - Contaminación de cargas contaminantes
    - Demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ )
    - Sólidos suspendidos totales (SST)
    - Temperatura ( $T$  °C)
    - Potencial de hidrógeno (pH)
    - Oxígeno disuelto (OD)
    - Coliformes fecales

---

<sup>2</sup> Agotamiento de los recursos no renovables o disminución de la disponibilidad de los recursos naturales, que está relacionado en este análisis al consumo de combustibles fósiles, entre otros, para la generación de energía.

<sup>3</sup> Para la categoría de Cambio Climático, las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) procedentes de las aguas residuales no se consideran en las directrices del IPCC, porque son de origen biogénico y no deben incluirse en el total nacional de emisiones.



### 3.3.2. Análisis del inventario

Una vez establecido el sistema y sus límites, se realizaron los diagramas de flujo concretos de la PTAR y se inició la fase de recolección de datos de inventario por subsistema. A manera de resumen, la tabla No. XVIII incluye la descripción de los subsistemas definidos en la PTAR.

Tabla XVIII. **Configuración de los subsistemas de la PTAR-USAC**

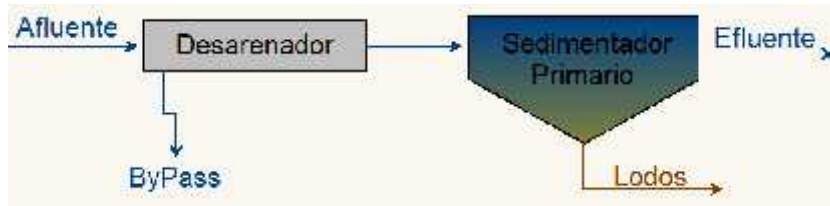
<b>Configuración por subsistema de la PTAR - USAC</b>	
<b>Subsistema 1</b>	Entrada de aguas residuales
	Pretratamiento
	Tratamiento primario
<b>Subsistema 2</b>	Tratamiento secundario: filtros percoladores y sedimentador secundario
	Descarga de agua tratada
<b>Subsistema 3</b>	Digestor de lodos
	Secado de lodos
<b>Subsistema 4</b>	Transporte de lodos
	Aplicación-utilización de lodos

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista tecnológico, dos de las diferencias más importantes que pueden generar fluctuaciones en el impacto ambiental son: el tipo de tecnología utilizada para el tratamiento secundario y, en menor medida, el tipo de unidades usadas para la deshidratación de lodos.

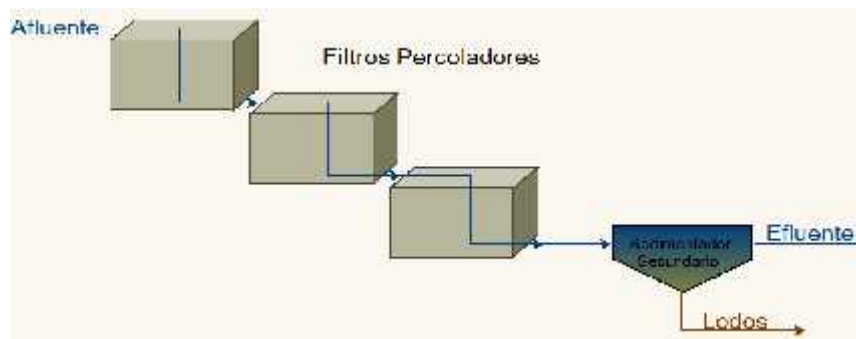
A continuación se presentan los diversos diagramas de flujo.

Figura 15. **Subsistema 1 de la PTAR-USAC**



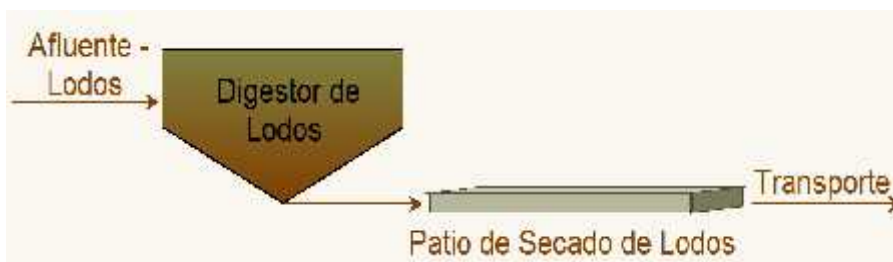
Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2013.

Figura 16. **Subsistema 2 de la PTAR-USAC**



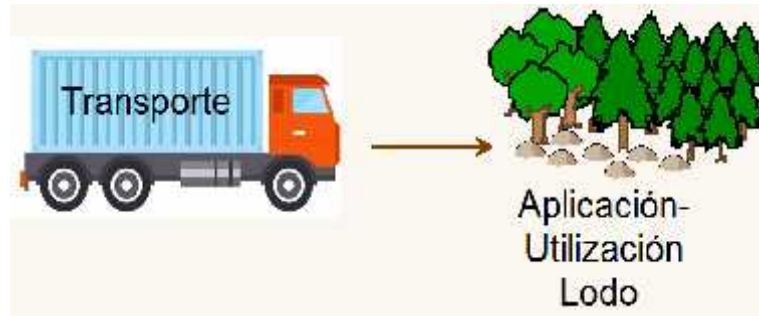
Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2013.

Figura 17. **Subsistema 3 de la PTAR-USAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2013.

Figura 18. **Subsistema 4 de la PTAR-USAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2013.

Plan de recolección de datos: en seguida se describe el procedimiento de recolección de datos:

- Toma de muestras: se realizó en tres puntos: entrada de aguas residuales (subsistema 1), salida tratamiento primario (subsistema 1) y descarga de agua tratada (subsistema 2). Adicional a esto se estimaron teóricamente las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) (subsistema 3).
- Determinación de número de muestras recolectadas y análisis estadístico: se recolectaron nueve muestras para cada punto de muestreo mencionado en el ítem anterior. El diseño y método estadístico planteado fue el denominado “t de *student*”, después de haber identificado las variables independientes y dependientes, según el objetivo de la investigación. El cálculo del número de muestra se estimó tomando en cuenta que se determinó la DBO como variable de diseño, debido a que es una de los parámetros más importantes, representativos y las variantes que se puedan tener en el proceso de depuración respecto de la eficiencia, como un subtema del análisis del impacto

ambiental. Una vez definida la variable de diseño y tomando en consideración los datos obtenidos a partir del trabajo de investigación del Ingeniero Oscar Ramírez, (2012, p. 58), se asumieron los siguientes valores en relación con la DBO<sub>5</sub>:

- Una desviación estándar en la entrada de 112 mg/L y una desviación estándar de salida de 6 mg/L.
- Una diferencia de medias esperada de al menos 128,5 mg/L (asumiendo la reducción en un 50 % como mínimo; aunque puede ser mayor).
- Nivel de significancia de 0,05 (5 %)
- Potencia de 90 %

De acuerdo con lo anterior, el número de muestras calculado y estimado por el Lic. Federico Nave (profesional en estadística del DIGI) con la ayuda del software estadístico “Epidat 3.1” fue de nueve muestras. Por tanto, se deben realizar en los tres puntos establecidos (entrada de la planta, salida sedimentador primario y salida del sedimentador secundario) las nueve tomas de muestras distintas.

Para el análisis se tomaron tres puntos para el cálculo de la muestra (entrada de la planta, salida sedimentador primario y salida del sedimentador secundario), lo cuales no son independientes por tratarse de un proceso lineal. Para realizar la prueba de “t de *student*” fue necesario realizar una prueba de normalidad (*shapiro-wilk*) a los datos obtenidos, para conocer si los datos seguían o no una distribución normal. Para aquellos que tuvieron un comportamiento normal se pudo comprobar la hipótesis “H<sub>0</sub>” (de que los datos seguían una distribución normal), y para aquellos que no tuvieron una distribución normal donde

no se podía utilizar la prueba “t de *student*”, se empleó la prueba de *Wilcoxon* de *ranks* con signo, para datos apareados.

También, la prueba de normalidad permitió conocer qué valor entre la media y mediana utilizar para los datos recolectados y posterior evaluación de impacto. A continuación se muestran los resultados de la prueba de normalidad.

Tabla XIX. **Pruebas de normalidad de datos del afluente de la PTAR-USAC**

<b>Pruebas de normalidad</b>			
	<i>Shapiro-Wilk</i>		
	Estadístico	gl	Sig.
<b>DQO</b>	,893	9	,249
<b>DBO<sub>5</sub></b>	,905	9	,284
<b>SS</b>	,865	9	,108
<b>pH</b>	,835	9	,051
<b>Temperatura*</b>	,674	9	,001
<b>OD</b>	,924	9	,427
<b>Nitratos</b>	,844	9	,064
<b>Fosfatos*</b>	,551	9	,000
<b>Coliformes fecales</b>	,783	9	,013
<b>* No normales (desvío significativo de la normalidad); usar mediana</b>			
<b>a. Corrección de significación de Lilliefors</b>			

Fuente: elaboración propia, empleando el programa SPSS.

Tabla XX. **Pruebas de normalidad de datos del efluente de la PTAR-USAC**

<b>Pruebas de normalidad</b>			
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
<b>DQO</b>	,960	9	,79324
<b>DBO5</b>	,959	9	,78661
<b>SS</b>	,967	9	,86770
<b>pH</b>	,892	9	,20810
<b>Temperatura*</b>	,748	9	,00514
<b>OD</b>	,848	9	,07139
<b>Nitratos</b>	,937	9	,54633
<b>Fosfatos*</b>	,494	9	,00001
<b>Colif-fec</b>	,855	9	,08396
<b>* No normales (desvío significativo de la normalidad)</b>			
<b>Usar mediana</b>			
<b>a. Corrección de significación de Lilliefors</b>			

Fuente: elaboración propia, empleando el programa SPSS.

- Frecuencia de medición y recolección de datos: la frecuencia con la que se desarrolló el muestreo y los ensayos de laboratorio fue semanal, durante los meses de octubre de 2016 y febrero/marzo de 2017. La tabla siguiente recoge la frecuencia de medición y el método empleado en la recolección de los distintos parámetros del inventario.

Tabla XXI. **Frecuencia y método experimental utilizado para la realización del ACV**

<b>Datos experimentales</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Frecuencia de medición</b>	<b>Método</b>
<b>Agua</b>		
<b>Caudal</b>	Una sola vez	PRO25-MUE
<b>DQO</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (5220 D)
<b>DBO5</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (5210 B)
<b>SST</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (2540 D)

Continuación de la tabla XXI.

<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Semanal, oct 16 y feb-mar 17</b>	<b>Stand. Meth (4500 E)</b>
<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (4500-P E)
<b>Temperatura</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (2550 B)
<b>pH</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (4500-H <sup>+</sup> B)
<b>Coliformes fecales</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (9223 B)
<b>Oxígeno disuelto</b>	Semanal, oct 16 y feb-mar 17	Stand. Meth (4500-O B)
<b>Emisiones al aire</b>		
<b>CH<sub>4</sub></b>	Una sola vez	IPCC

Fuente: elaboración propia, empleando el programa SPSS.

Los datos de inventario recolectados en la PTAR, incluyen las entradas y salidas del agua, el consumo de electricidad, así como el tratamiento y transporte de los lodos, si así lo contempla el sistema.

Tabla XXII. **Datos del afluente y efluente de la PTAR-USAC<sup>4</sup>**

Parámetros	PTAR-USAC –filtros percoladores	
ENTRADAS		
<b>AFLUENTE</b>		
<b>DQO</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,483
<b>DBO5</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,173
<b>SST</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,246
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	kg/m <sup>3</sup>	0.001
<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	kg/m <sup>3</sup>	0,028
<b>Temperatura</b>	°C	23
<b>pH</b>	unid pH	7,92
<b>Coliformes fecales</b>	kg/m <sup>3</sup>	10 462,000
<b>OD</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,001
<b>DATOS DE BACKGROUND</b>		
<b>Energía (total)</b>	MJ/m <sup>3</sup>	0,00

<sup>4</sup> Los valores del afluente y efluente obtenidos en esta tabla se pueden ver y analizar con más amplitud en los anexos de este documento.

Continuación de la tabla XXII.

<b>SALIDAS</b>		
<b>DESCARGA AL AGUA – EFLUENTE</b>		
<b>DQO</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,027
<b>Remoción DQO</b>	%	94,39
<b>DBO5</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,005
<b>Remoción DBO5</b>	%	97,13
<b>SST</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,006
<b>Remoción SST</b>	%	97,50
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	kg/m <sup>3</sup>	0,080
<b>Remoción NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	%	0,00
<b>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	kg/m <sup>3</sup>	0,025
<b>Remoción PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	%	10,71
<b>Temperatura</b>	°C	19,70
<b>Variación temperatura</b>	°C	3,20
<b>pH</b>	unid pH	5,75
<b>Variación pH</b>	unid pH	2,17
<b>Coliformes fecales</b>	kg/m <sup>3</sup>	95,602
<b>Remoción de coliformes fecales</b>	%	99,09
<b>OD</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,006
<b>Variación OD</b>	kg/m <sup>3</sup>	0,005
<b>EMISIONES AL AIRE</b>		
<b>CH<sub>4</sub></b>	Kg/m <sup>3</sup>	0,009

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Evaluación de impactos

Para la realización de la evaluación de los impactos de ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se utilizó la metodología “CML 2001” elaborada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos y modificada para esta investigación; así como también, el ICC (índice de carga contaminante), desarrollado en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por un



panel de expertos nacionales e internacionales en el tema, basándose en el indicador de calidad de aguas (ICA) de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) de los Estados Unidos.

### 3.3.3.1. Metodología CML 2001

A continuación se describe la presente metodología.

Clasificación - categorías de impacto: como se mencionó anteriormente, las categorías consideradas para evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales son las siguientes:

- Agotamiento de los recursos abióticos – CML 2001
- Cambio climático – CML 2001
- Eutrofización – CML 2001
- Contaminación de cargas contaminantes - ICC

Estas categorías representan los impactos ambientales de interés, a los cuales se quieren asignar los resultados del inventario del ciclo de vida; es decir, los impactos ambientales de los cuales se desean obtener resultados.

Tabla XXIII. **Clasificación de la categorías de impacto según su factor de caracterización y unidad de referencia**

Categoría de impacto	Escala	Clasificación	Posible factor de caracterización	Unidad de referencia
<b>Agotamiento de los recursos abióticos</b>	Regional	Energía	Cantidad consumida	MJ

Continuación de la tabla XXIII.

<b>Cambio Climático</b>	<b>Global</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Potencial de calentamiento global (PCG)</b>	<b>Kg. Eq CO<sub>2</sub></b>
<b>Eutrofización</b>	Local	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> DQO	Potencial de eutrofización	Kg. Eq PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
<b>Contaminación de cargas contaminantes</b>	Local	DBO <sub>5</sub> SST Coliformes fecales OD pH Temperatura	Potencial de contaminación de cargas contaminantes	ICC

Fuente: elaboración propia.

Caracterización: una vez que cada parámetro del ICV (inventario de ciclo de vida) se ha asignado a una o más categorías de impacto ambiental a través de la clasificación, se compara su valor respecto del parámetro de referencia de dicha categoría.

Esto se lleva a cabo a través de los factores de caracterización de cada parámetro, y representan la contribución de un parámetro a una determinada categoría de impacto en relación con el parámetro de referencia en dicha categoría. Cada parámetro es multiplicado por su correspondiente factor de caracterización. De este modo se pueden obtener valores con unidades equivalentes, los cuales pueden ser sumados para medir la contribución de las sustancias a esa categoría de impacto. En la siguiente tabla se muestra el resultado de la caracterización del proceso de 1 m<sup>3</sup> del afluente tratado por la PTAR de la USAC.

Tabla XXIV. **Caracterización de 1 m<sup>3</sup> del efluente descargado**

ICV	Agotamiento recursos abióticos (MJ)	Cambio Climático (Kg eq CO <sub>2</sub> )	Eutrofización (Kg eq PO <sub>4</sub> )
0 MJ	x 1 = 0	-	-
0,009 kg CH <sub>4</sub>	-	x 28 = 0.2563	-
0,080 kg NO <sub>3</sub>	-	-	x 0.1 = 0.0080
0,025 kg PO <sub>4</sub>	-	-	x 1 = 0.0250
0,027 kg DQO	-	-	x 0.022 = 0.0006
<b>Caracterización (CML 2001)</b>	<b>0 MJ</b>	<b>0.2563 kg eq CO<sub>2</sub></b>	<b>0.0336 Kg eq PO<sub>4</sub></b>

\*Potencial del Calentamiento Global (GWP) a 100 años de los principales gases de efecto invernadero según, metodologías IPCC 2013 y CML 2001

Fuente: elaboración propia.

Normalización – ponderación: la normalización consiste en la evaluación de la significación del perfil ambiental generado en los pasos anteriores, mediante el establecimiento del peso de cada categoría. Esta etapa permite la adimensionalización de las categorías y la comparación entre las mismas. De una manera más simple, es la conversión de los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización. A través de estos factores se representa el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental local. En la tabla siguiente se muestran los resultados de la normalización.

Tabla XXV. **Análisis normalizado de 1 m<sup>3</sup> del efluente descargado**

ICV	Agotamiento recursos abióticos (MJ)	Cambio Climático (Kg eq CO <sub>2</sub> )	Eutrofización (Kg eq PO <sub>4</sub> )
0 MJ	x 1 = 0	-	-
0,009 kg CH <sub>4</sub>	-	x 28 = 0.2563	-
0,080 kg NO <sub>3</sub>	-	-	x 0.1 = 0.0080
0,025 kg PO <sub>4</sub>	-	-	x 1 = 0.0250
0,027 kg DQO	-	-	x 0.022 = 0.0006
<b>Caracterización (CML 2001)</b>	<b>0 MJ</b>	<b>0.2563 kg eq CO<sub>2</sub></b>	<b>0.0336 Kg eq PO<sub>4</sub></b>
<i>Factor de Normalización</i>	<i>x 6,32E-12</i>	<i>x 2,27E-14</i>	<i>x 7,53E-12</i>
<b>Normalización (CML 2001)</b>	<b>0</b>	<b>5,819E-15</b>	<b>2,531E-13</b>

\*Potencial del Calentamiento Global (GWP) a 100 años de los principales gases de efecto invernadero según, metodologías IPCC 2013 y CML 2001.

Fuente: elaboración propia.

La normalización permite determinar hasta qué grado cada categoría de impacto contribuye en forma significativa al problema ambiental global.

### 3.3.3.2. Metodología ICC

Para determinar el índice de carga contaminante – ICC en las aguas residuales, con el objetivo de identificar un valor que aglutine varios parámetros dentro de la evaluación de los impactos de ciclo de vida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala se aplicaron dos metodologías: el índice de calidad de agua desarrollado en 1970 por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, la cual utilizó la técnica de investigación Delphi de la “Rand

Corporación's" y el índice de calidad de agua para el Río Des Moines, que se dio a partir del índice NSF, en consideración a su amplia aplicación.

En estas metodologías se utilizan comúnmente los paneles de expertos. El índice de la Fundación Nacional de Saneamiento (INSF), tiene la característica de ser un índice multiparámetro, y se basó en tres estudios para definir concretamente la metodología y las "relaciones funcionales" o "curvas de función".

Para las curvas de función, los investigadores promediaron todas las curvas para producir, de la misma manera, una curva promedio para cada contaminante. Luego las curvas fueron graficadas a través del uso de la media aritmética con un límite de confianza del 80 % sobre este valor medio, (ver gráficas en anexos).

Las gráficas tomadas en consideración para la obtención de los subíndices del ICC fueron las elaboradas por INSF, a excepción de la gráfica de los sólidos suspendidos, que se tomó la del índice de calidad de agua para el Río Des Moines, ya que el INSF no la desarrolló.

De acuerdo con el índice de calidad de agua para el Río Des Moines, la curva de sólidos suspendidos fue determinada por el sistema de clasificación de Prati, que asigna calificaciones a las siguientes concentraciones:

- Excelente 20 ppm
- Aceptable 40 ppm
- Ligeramente contaminada 100 ppm
- Contaminada 278 ppm
- Altamente contaminada >278 ppm

Estas concentraciones se trasladaron a unidades en mg/L para obtener los nuevos rangos, con los que se construyó la correspondiente curva, (ver anexos):

- Excelente 91-100
- Aceptable 71-90
- Ligeramente contaminada 50-70
- Contaminada 26-50
- Altamente contaminada 0-25

Las curvas de clasificación o curvas de funciones (gráficas) determinan el subíndice para cada parámetro y posteriormente este es multiplicado por el factor de ponderación que indica la importancia que las variables tienen para la calidad de agua. Por definición, la suma de los factores debe ser 1, (ver tabla XXVI). Seguidamente los valores obtenidos se suman (ver tabla XXVIII).

Tabla XXVI. **Variables y pesos del ICC<sup>5</sup>**

ICC	
Parámetro	Importancia
Sólidos suspendidos	0,16
DBO <sub>5</sub>	0,23
Potencial de hidrógeno	0,13
Oxígeno disuelto	0,19
Variación temperatura	0,12
Coliformes fecales	0,17

Fuente: elaboración propia.

<sup>5</sup> Para estos valores se utilizó el método DELPHI por medio de paneles de expertos, los cuales aportaron su valor de importancia a los diferentes parámetros y posteriormente se determinaron los promedios aritméticos de cada parámetro.

Para calcular el índice de carga contaminante se usó una suma lineal ponderada de subíndices. El resultado de su aplicación, debe ser un número entre 0 y 100, donde 0 representa la calidad de agua fuertemente contaminada y 100 representa la calidad de agua aceptable.

Se debe recordar que una vez obtenido el valor Q de la curva, se multiplicó por su factor de ponderación para obtener el subtotal, puntaje parcial.

Tabla XXVII. **Aplicación del ICC para la PTAR de la USAC**

<b>Datos ICC</b>					
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>PTAR USAC</b>	<b>Factor de ponderación</b>	<b>Subíndices</b>	<b>Subtotal PTAR USAC</b>
<b>SST</b>	mg/L	6,14	0,16	97	15,52
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	4,96	0,23	55	12,65
<b>pH</b>	Unidad pH	5,75	0,13	49	6,37
<b>Oxígeno disuelto</b>	% sat.	57,58	0,19	53	10,07
<b>Temperatura</b>	°C	0,64	0,12	91	10,92
<b>Coliformes fecales</b>	NMP/100 ml	95 602,22	0,17	4	0,68
<b>Valor total y código de color</b>					<b>56,21</b>

Fuente: elaboración propia.

El resultado final es interpretado de acuerdo con la siguiente escala de clasificación, en la que el fondo representa el color correspondiente a cada rango.

Tabla XXVIII. **Código de color del ICC**

ICC			
Descriptores	Rango		Color
<b>Fuertemente contaminada</b>	0	33	Rojo
<b>Contaminada</b>	34	66	Amarillo
<b>Aceptable</b>	67	100	Verde

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Análisis técnico

El análisis técnico permite evaluar y proponer diferentes opciones tecnológicas para el buen funcionamiento y mejoramiento de la PTAR, verificando la factibilidad técnica de cada una de las unidades que la componen. Con este análisis se identifican equipos, maquinaria, instalaciones necesarias, costos de inversión y capital de trabajo. Para la elaboración del estudio técnico es necesario apoyarse a través de una boleta de diagnóstico, la cual, para un proyecto implica analizar variables relacionadas con aspectos generales como: ubicación, tamaño, tecnología, entre otras; asimismo, basadas en las características del proyecto que permiten obtener las fuentes, estimaciones de caudal, sistema de tratamiento, descarga, entre otros.

#### 3.4.1. Operación y mantenimiento idóneo de las PTAR's

Se ha comprobado que en Guatemala uno de los mayores problemas respecto de las PTAR's es la selección de la tecnología, la cual debe de ser idónea a las características del agua, condiciones de la comunidad y a las habilidades del operador. Por otra parte, a veces se encuentra que la tecnología es la adecuada, pero fracasa por una inadecuada operación y/o mantenimiento,



y que puede agravarse por la ausencia o insuficiencia de registros, procedimientos inadecuados de manejo de datos, ausencia de informes o falta de registros de laboratorio.

El mantenimiento debe considerarse como mínimo dos tipos:

- Correctivo: el cual consiste en intervenciones no programadas dirigidas a devolver la unidad o proceso averiado al estado operacional que tenía antes de que se presentara el defecto o problema.
- Preventivo: son todas las actividades periódicas de cuidado e inspección programadas para prevenir la falla y prolongar el funcionamiento adecuado de las unidades o infraestructura de la PTAR.

Como mínimo se espera que exista un encargado de la operación de la planta, quien se ocupa de retirar cuerpos flotantes, grasas, materia orgánica e inorgánica, en rejillas y tanques de proceso que apliquen; para lo cual deberá contar con las herramientas adecuadas. Es necesario que lleve una bitácora de los cambios e imprevistos que surjan durante la operación de la planta para un mayor control y respaldo.

- Manual de operación y mantenimiento: tienen como objetivo principal, proporcionar los mecanismos o protocolos necesarios de solución a las eventuales fallas o a las actividades de mantenimiento en detalle, otorgando al operador las herramientas de trabajo bajo la forma de instructivo. Los manuales están conformados por una serie de reglas y procedimientos a los cuales deben ajustarse el o los responsables de las actividades de operación y mantenimiento, para un apropiado funcionamiento de la PTAR.

- Operador: este requiere tener conocimiento sobre diversos temas vinculados con su trabajo, para cumplir con las responsabilidades que ello demanda, entre las cuales están:
  - Estar familiarizado con la PTAR (función de cada unidad o proceso, capacidad de tratamiento, forma de evaluar la operación de cada proceso y su interacción).
  - Tener conocimiento teórico y práctico de los procesos de operación y de mantenimiento de la planta.
  - Ser consciente de la importancia de su trabajo en la conservación del medio ambiente y de la salud de la población en general.
- Responsabilidades: si el operador posee el conocimiento descrito anteriormente puede lograr una buena operación; por tanto deberá de cumplir con las siguientes responsabilidades:
  - Variar la operación de la planta de tratamiento, para atender los cambios de caudal o condiciones de carga, teniendo en cuenta la capacidad de cada proceso de tratamiento de la planta en su conjunto.
  - Mantener un registro completo y exacto de todos los acontecimientos relacionados con la operación y el mantenimiento.
  - Supervisar y capacitar al personal que tenga a su cargo, en la teoría, práctica de operación, mantenimiento, seguridad y salud ocupacional, registro, entre otros.
  - Preparar informes básicos del registro de operación y mantenimiento.

- Ser capaz de comunicarse con un lenguaje adecuado con sus subordinados y jefes sobre los diferentes temas vinculados con el tratamiento de aguas residuales.
- Registros operacionales y reportes periódicos: el programa de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales de las plantas se diseña a partir del supuesto de que existirá una conveniente política de registro periódico de los parámetros operacionales. La selección de los parámetros a ser registrados, debe tener en cuenta el uso que se pudiera dar a la información procesada, principalmente en lo relacionado con el aspecto de control y evaluación de los procesos de tratamiento, y el agua tratada. Cada parámetro seleccionado debe ser cuestionado con el objeto de optar únicamente por aquellos considerados estrictamente como importantes para el trabajo.

Los registros en general son de mucha importancia y necesidad en las labores operativas y de mantenimiento de las plantas de tratamiento, ya que permiten obtener información sobre diversos aspectos, tales como:

- Eficiencia de los procesos de tratamiento.
- Efectividad del tipo y frecuencia de mantenimiento para los diferentes procesos de tratamiento.
- Criterios para la modificación del plan de operación o mantenimiento.
- Desempeño de la planta de tratamiento.
- Suministro de la información necesaria para la preparación de los reportes mensuales o anuales.
- Calidad del efluente.

Generalmente, se acostumbra a clasificar los registros en cuatro grupos:

- Registros de operación o funcionamiento
  - Caudal de entrada y salida de la planta de tratamiento
  - Características fisicoquímicas y biológicas de afluentes y efluentes
  
- Registros de mantenimiento
  - Mantenimiento de planta.
  - Registros de mantenimiento preventivo y correctivo de los procesos de tratamiento.
  - Mantenimiento de la edificación.
  - Mantenimiento de conductos, canales y componentes de la planta.
  - Mantenimiento de estructuras de medición.
  - Mantenimiento de sensores, si fuese el caso.
  - Mantenimiento de equipo mecánico, electromecánico o eléctrico.
  
- Registros de determinación de costos
  - Adquisiciones realizadas en el año.
  - Planillas de sueldos y salarios del personal administrativo, de operación y mantenimiento.
  - Registro de gastos efectuados por otros conceptos
  
- Registros de personal
  - Personal empleado
  - Horas de trabajo por jornada o tareas
  - Funciones
  - Categorización
  - Programas de capacitación

### 3.4.2. Resultados y eficiencias de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos

Caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento: la medición para determinar el caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento, se realizó en un día sin lluvia y durante el horario normal de trabajo del personal responsable de su operación y mantenimiento.

Figura 19. Variación del caudal de agua residual que ingresa a la PTAR de la USAC



Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por Laboratorio ECOQUIMSA.

Los puntos rojos (recolección de muestras) indican la hora en la cual se realizaron los diferentes muestreos y su caudal aproximado en su momento.

Tabla XXIX. **Valores de caudal máximo, mínimo y medio**

Caudal	L/s
<b>Qmáx=</b>	5,45
<b>Qmed=</b>	3,89
<b>Qmin=</b>	1,81

Fuente: elaboración propia.

La medición en campo determinó que el caudal medio y máximo es de 3,89 y 5,45 L/s, respectivamente; sin embargo, según la documentación que contiene archivada la División de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el caudal promedio y máximo para el cual la planta de tratamiento fue diseñada es de 9 y 16 L/s.

Desempeño de procesos de tratamiento: para cada parámetro se analizó su concentración en el efluente de cada proceso de tratamiento (pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario).

Tabla XXX. **Variación de la concentración de materia orgánica, DBO<sub>5</sub>**

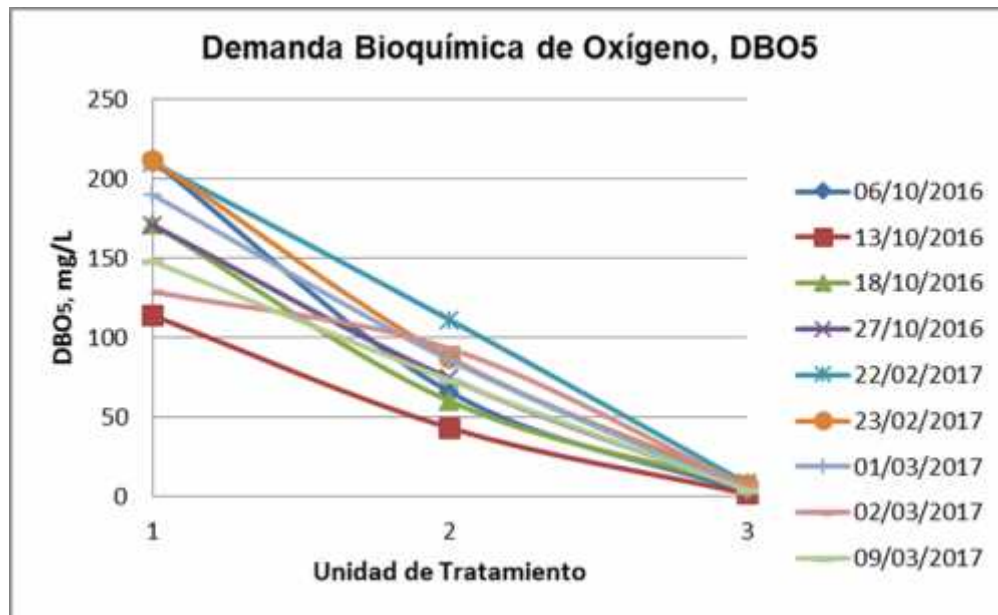
Muestreo	Fecha	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		
		Unidad de tratamiento		
		Afluente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (2)
<b>1</b>	06/10/2016	211,50	65,80	2,82
<b>2</b>	13/10/2016	113,99	43,10	1,65

Continuación de la tabla XXX.

<b>3</b>	18/10/2016	171,50	60,00	6,20
<b>4</b>	27/10/2016	171,00	74,25	4,36
<b>5</b>	22/02/2017	210,50	111,21	8,10
<b>6</b>	23/02/2017	212,00	87,45	7,30
<b>7</b>	01/03/2017	190,00	85,80	3,85
<b>8</b>	02/03/2017	129,00	93,06	6,44
<b>9</b>	09/03/2017	148,00	73,25	3,90
<b>Mínimo</b>		113,99	43,10	1,65
<b>Máximo</b>		212,00	111,21	8,10
<b>Promedio</b>		173,05	77,10	4,96
<b>Desviación estándar</b>		36,65	20,00	2,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Variación de la concentración de materia orgánica, DBO<sub>5</sub>



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

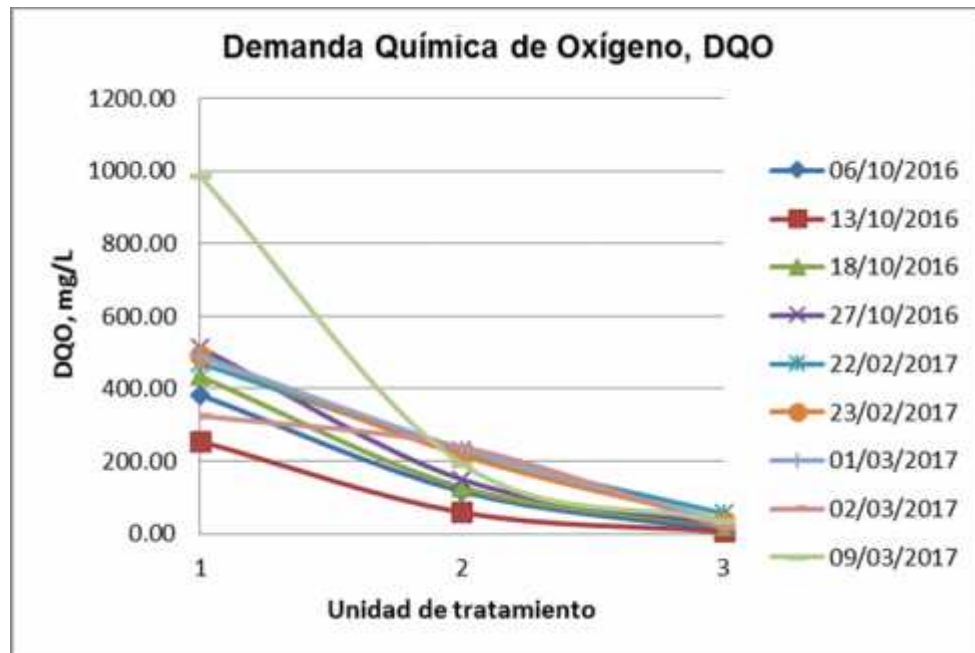
Tabla XXXI. **Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno, DQO**

DQO (mg/L)				
Muestreo	Fecha	Unidad de tratamiento		
		Afluente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (3)
<b>1</b>	06/10/2016	383,00	117,00	9,00
<b>2</b>	13/10/2016	255,00	59,00	6,00
<b>3</b>	18/10/2016	434,00	128,00	23,00
<b>4</b>	27/10/2016	513,00	150,00	25,00
<b>5</b>	22/02/2017	471,00	229,00	56,00
<b>6</b>	23/02/2017	492,00	217,00	37,00
<b>7</b>	01/03/2017	490,00	234,00	34,00
<b>8</b>	02/03/2017	326,00	240,00	19,00
<b>9</b>	09/03/2017	986,00	193,00	35,00
<b>Mínimo</b>		255,00	59,00	6,00
<b>Máximo</b>		986,00	240,00	56,00
<b>Promedio</b>		483,33	174,11	27,11
<b>Desviación estándar</b>		207,13	63,60	15,42

Fuente: elaboración propia.



Figura 21. **Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno, DQO**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXXII. **Variación de la concentración de los sólidos suspendidos, SS**

Sólidos suspendidos (mg/L)				
Muestreo	Fecha	Unidad de Tratamiento		
		Afluente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (3)
1	06/10/2016	187,50	40,00	0,30
2	13/10/2016	115,25	25,52	2,42
3	18/10/2016	225,81	32,05	13,18
4	27/10/2016	276,00	28,87	5,51
5	22/02/2017	300,00	36,36	7,40
6	23/02/2017	277,14	26,06	6,98

Continuación de la tabla XXXII.

<b>7</b>	01/03/2017	188,00	25,76	2,67
<b>8</b>	02/03/2017	120,51	42,98	7,83
<b>9</b>	09/03/2017	524,00	28,93	9,00
<b>Mínimo</b>		115,25	25,52	0,30
<b>Máximo</b>		524,00	42,98	13,18
<b>Promedio</b>		246,02	31,84	6,14
<b>Desviación estándar</b>		123,54	6,51	3,93

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Variación de la concentración de los sólidos suspendidos**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXXIII. **Variación de la temperatura promedio, T**

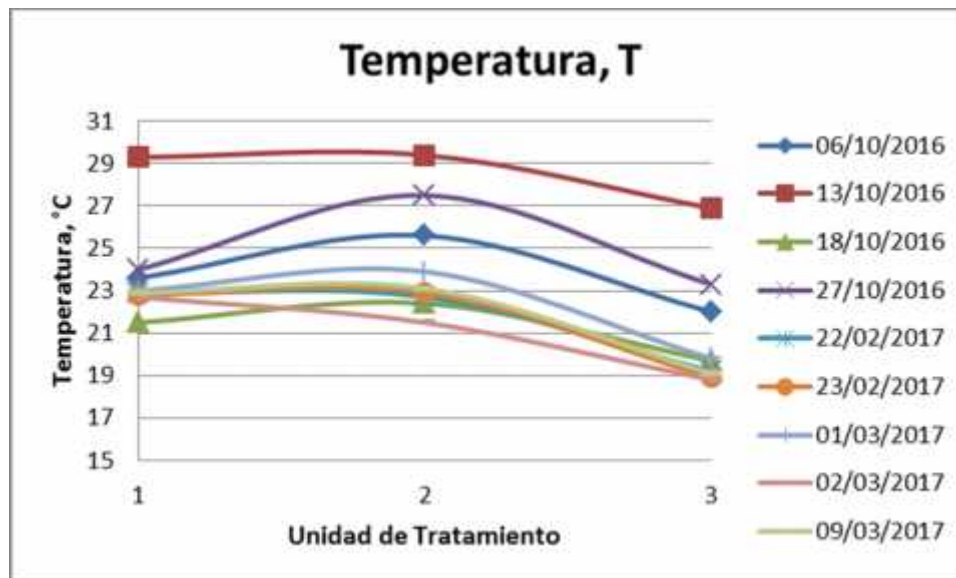
Muestreo	Fecha	Temperatura (°C)		
		Unidad de tratamiento		
		Afluente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (3)
<b>1</b>	06/10/2016	23,60	25,60	22,00

Continuación de la tabla XXXIII.

<b>2</b>	13/10/2016	29,30	29,40	26,90
<b>3</b>	18/10/2016	21,50	22,40	19,70
<b>4</b>	27/10/2016	24,00	27,50	23,30
<b>5</b>	22/02/2017	22,90	22,70	19,20
<b>6</b>	23/02/2017	22,80	22,90	18,90
<b>7</b>	01/03/2017	23,00	23,90	19,80
<b>8</b>	02/03/2017	22,70	21,50	18,80
<b>9</b>	09/03/2017	22,90	23,10	19,10
<b>Mínimo</b>		21,50	21,50	18,80
<b>Máximo</b>		29,30	29,40	26,90
<b>Promedio</b>		23,63	24,33	20,86
<b>Desviación estándar</b>		2,23	2,63	2,74

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Variación de la temperatura promedio, T



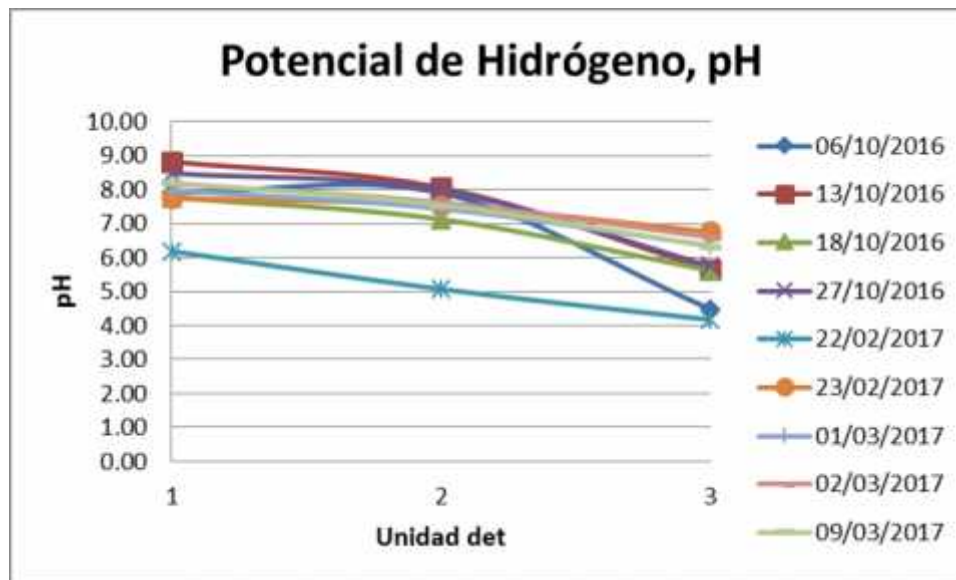
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXXIV. **Variación del potencial de hidrógeno, pH**

<b>Potencial de Hidrógeno (unidades pH)</b>				
<b>Muestreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Unidad de tratamiento</b>		
		<b>Afluente (1)</b>	<b>Sedimentador primario (2)</b>	<b>Sedimentador secundario (3)</b>
<b>1</b>	06/10/2016	7,90	7,90	4,48
<b>2</b>	13/10/2016	8,82	8,06	5,65
<b>3</b>	18/10/2016	7,77	7,13	5,62
<b>4</b>	27/10/2016	8,48	7,98	5,75
<b>5</b>	22/02/2017	6,19	5,07	4,17
<b>6</b>	23/02/2017	7,74	7,54	6,76
<b>7</b>	01/03/2017	7,98	7,44	6,35
<b>8</b>	02/03/2017	8,18	7,62	6,60
<b>9</b>	09/03/2017	8,20	7,55	6,33
<b>Mínimo</b>		6,19	5,07	4,17
<b>Máximo</b>		8,82	8,06	6,76
<b>Promedio</b>		7,92	7,37	5,75
<b>Desviación estándar</b>		0,73	0,91	0,91

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Variación del potencial de hidrógeno, pH



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXXV. Variación de la concentración de oxígeno disuelto, OD

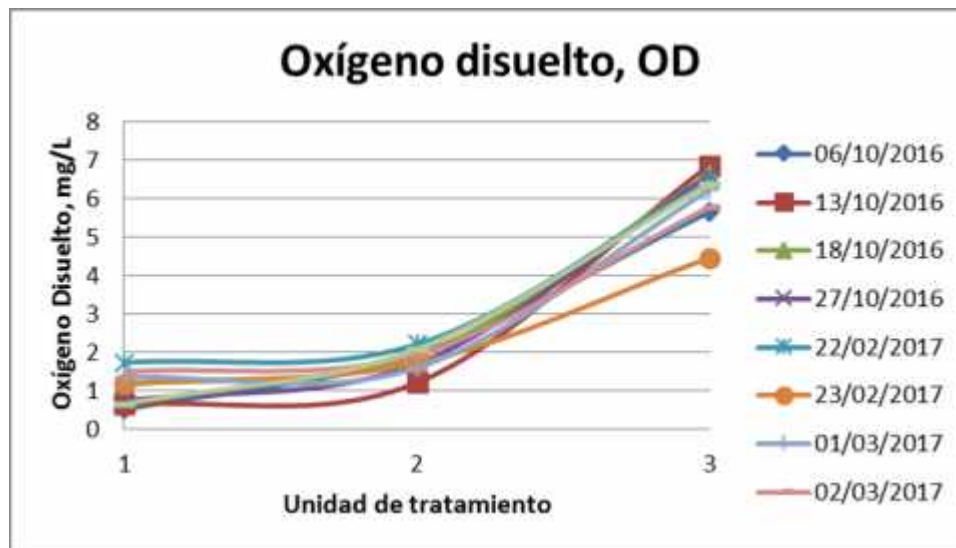
Oxígeno disuelto (mg/L)				
Muestreo	Fecha	Unidad de tratamiento		
		Afluente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (3)
1	06/10/2016	0,51	1,95	5,66
2	13/10/2016	0,63	1,20	6,87
3	18/10/2016	1,15	1,90	6,63
4	27/10/2016	0,73	1,70	6,61
5	22/02/2017	1,73	2,20	6,45
6	23/02/2017	1,18	1,72	4,46
7	01/03/2017	1,35	1,59	6,23
8	02/03/2017	1,49	1,94	5,78
9	09/03/2017	0,65	2,08	6,39
<b>Mínimo</b>		0,51	1,20	4,46

Continuación de la tabla XXXV.

<b>Máximo</b>	1,73	2,20	6,87
<b>Promedio</b>	1,05	1,81	6,12
<b>Desviación estándar</b>	0,43	0,30	0,74

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Variación de la concentración de oxígeno disuelto, OD**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Variación de la concentración de nitratos, NO<sub>3</sub>**

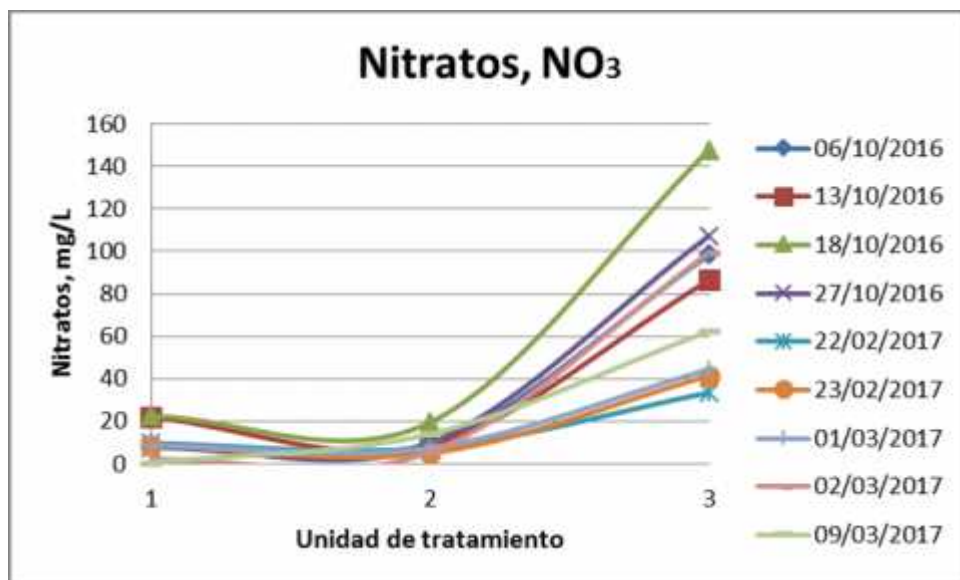
Muestreo	Fecha	Nitratos (mg/L)		
		Unidad de tratamiento		
		Afluyente (1)	Sedimentador primario (2)	Sedimentador secundario (3)
1	06/10/2016	8,00	8,50	98,50

Continuación de la tabla XXXVI.

2	13/10/2016	22,00	9,00	86,50
3	18/10/2016	22,50	19,50	148,00
4	27/10/2016	7,50	10,00	107,50
5	22/02/2017	9,60	7,50	33,50
6	23/02/2017	8,50	5,00	41,50
7	01/03/2017	8,50	7,50	44,50
8	02/03/2017	2,00	5,50	99,50
9	09/03/2017	0,50	14,00	62,50
<b>Mínimo</b>		0,50	5,00	33,50
<b>Máximo</b>		22,50	19,50	148,00
<b>Promedio</b>		9,90	9,61	80,22
<b>Desviación estándar</b>		7,66	4,55	37,68

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Variación de la concentración de nitratos,  $\text{NO}_3$



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

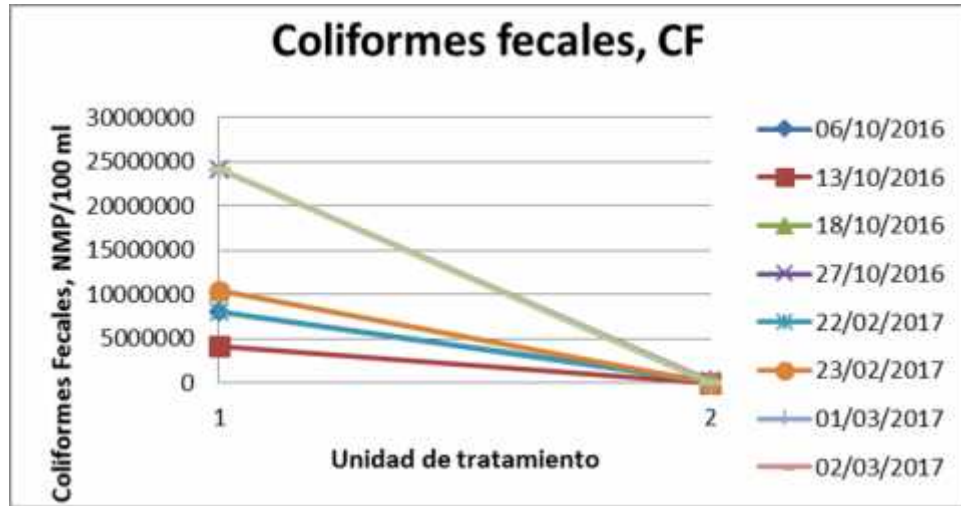
Tabla XXXVII. **Variación de la concentración de coliformes fecales, CF**

<b>Coliformes fecales (NMP/100 ml)</b>			
<b>Muestreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Unidad de tratamiento</b>	
		<b>Afluente (1)</b>	<b>Sedimentador secundario (2)</b>
<b>1</b>	06/10/2016	8 065 325,27	241 990,00
<b>2</b>	13/10/2016	4 160 000,00	520,00
<b>3</b>	18/10/2016	10 462 000,00	7 710,00
<b>4</b>	27/10/2016	24 196 000,00	241 960,00
<b>5</b>	22/02/2017	8 065 325,27	111 990,00
<b>6</b>	23/02/2017	10 462 000,00	18 600,00
<b>7</b>	01/03/2017	24 196 000,00	23 590,00
<b>8</b>	02/03/2017	24 196 000,00	141 360,00
<b>9</b>	09/03/2017	24 196 000,00	72 700,00
<b>Mínimo</b>		4 160 000,00	520,00
<b>Máximo</b>		24 196 000,00	241 990,00
<b>Promedio</b>		15 333 183,39	95 602,22
<b>Desviación estándar</b>		8 603 331,32	95 928,10

Fuente: elaboración propia.



Figura 27. Variación de la concentración de coliformes fecales, CF



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Eficiencia global de la PTAR de la USAC: a continuación se muestran las eficiencias obtenidas en la remoción de la materia orgánica, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos y coliformes fecales del sistema de tratamiento.

Tabla XXXVIII. Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO<sub>5</sub>

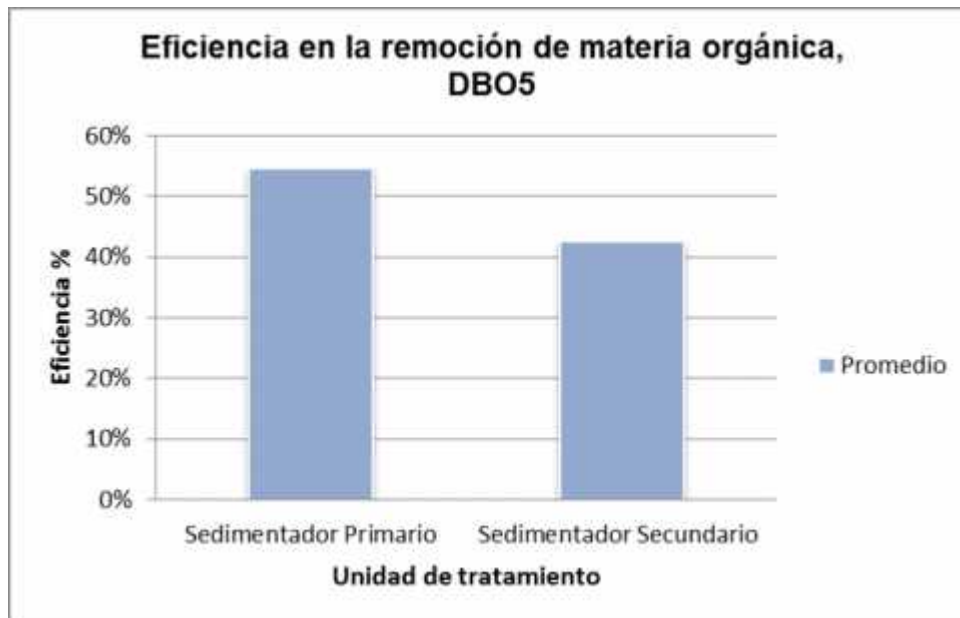
DBO <sub>5</sub> - Porcentaje de eficiencia, %			
Muestreo	Fecha	Unidad de tratamiento	
		Sedimentador primario	Sedimentador secundario
1	06/10/2016	68,89 %	29,78 %
2	13/10/2016	62,19 %	36,36 %
3	18/10/2016	65,01 %	31,37 %
4	27/10/2016	56,58 %	40,87 %
5	22/02/2017	47,17 %	48,98 %
6	23/02/2017	58,75 %	37,81 %

Continuación de la tabla XXXVIII.

<b>7</b>	01/03/2017	54,84 %	43,13 %
<b>8</b>	02/03/2017	27,86 %	67,15 %
<b>9</b>	09/03/2017	50,51 %	46,86 %
<b>Mínimo</b>		27,86 %	29,78 %
<b>Máximo</b>		68,89 %	67,15 %
<b>Promedio</b>		54,64 %	42,48 %
<b>Desviación estándar</b>		12,14 %	11,27 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO<sub>5</sub>**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXXIX. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO**

<b>DQO - Porcentaje de eficiencia, %</b>			
<b>Muestreo</b>	<b>Fecha</b>	<b>Unidad de tratamiento</b>	
		<b>Sedimentador primario</b>	<b>Sedimentador secundario</b>
<b>1</b>	06/10/2016	69,45 %	28,20 %
<b>2</b>	13/10/2016	76,86 %	20,78 %
<b>3</b>	18/10/2016	70,51 %	24,19 %
<b>4</b>	27/10/2016	70,76 %	24,37 %
<b>5</b>	22/02/2017	51,38 %	36,73 %
<b>6</b>	23/02/2017	55,89 %	36,59 %
<b>7</b>	01/03/2017	52,24 %	40,82 %
<b>8</b>	02/03/2017	26,38 %	67,79 %
<b>9</b>	09/03/2017	80,43 %	16,02 %
<b>Mínimo</b>		26,38 %	16,02 %
<b>Máximo</b>		80,43 %	67,79 %
<b>Promedio</b>		61,55 %	32,83 %
<b>Desviación estándar</b>		16,87 %	15,45 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de los sólidos suspendidos, SS**

SS - Porcentaje de eficiencia, %			
Muestreo	Fecha	Unidad de tratamiento	
		Sedimentador primario	Sedimentador secundario
1	06/10/2016	78,67 %	21,17 %
2	13/10/2016	77,86 %	20,04 %
3	18/10/2016	85,81 %	8,36 %
4	27/10/2016	89,54 %	8,46 %
5	22/02/2017	87,88 %	9,65 %
6	23/02/2017	90,60 %	6,88 %
7	01/03/2017	86,30 %	12,28 %
8	02/03/2017	64,33 %	29,17 %
9	09/03/2017	94,48 %	3,80 %
<b>Mínimo</b>		64,33 %	3,80 %

Continuación de la tabla XL.

<b>Máximo</b>	94,48 %	29,17 %
<b>Promedio</b>	83,94 %	13,31 %
<b>Desviación estándar</b>	9,09 %	8,31 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de los sólidos suspendidos, SS**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de coliformes fecales, CF**

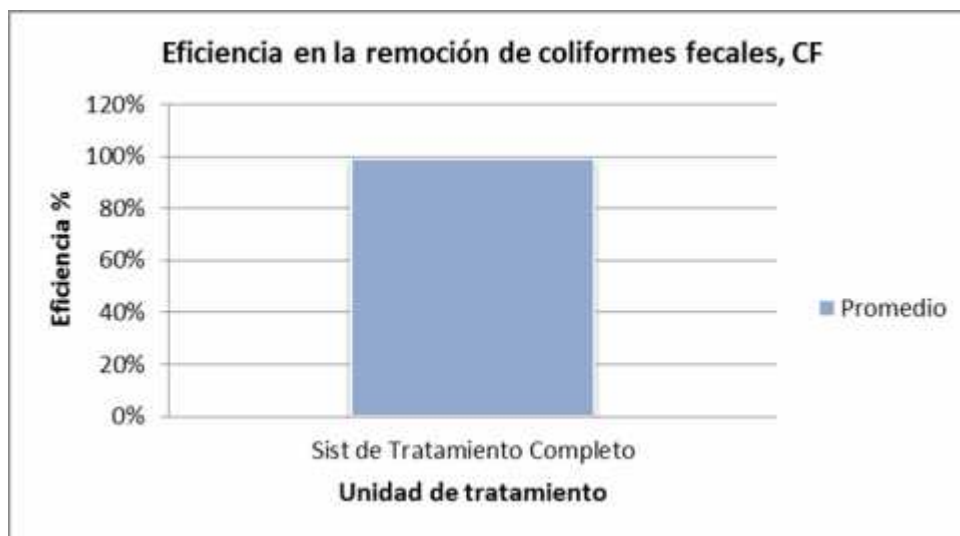
CF - Porcentaje de eficiencia, %		
Muestreo	Fecha	Unid de tratamiento
		Sistema de tratamiento completo
1	06/10/2016	97,00 %

Continuación de la tabla XLI.

<b>2</b>	13/10/2016	99,99 %
<b>3</b>	18/10/2016	99,93 %
<b>4</b>	27/10/2016	99,00 %
<b>5</b>	22/02/2017	98,61 %
<b>6</b>	23/02/2017	99,82 %
<b>7</b>	01/03/2017	99,90 %
<b>8</b>	02/03/2017	99,42 %
<b>9</b>	09/03/2017	99,70 %
<b>Mínimo</b>		97,00 %
<b>Máximo</b>		99,99 %
<b>Promedio</b>		99,26 %
<b>Desviación estándar</b>		0,97 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de CF**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

### 3.4.3. Diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos

El diagnóstico, junto con la medición de la eficiencia y la evaluación tecnológica a la planta de tratamiento, pretende guiar la toma de decisiones en cuanto a las mejoras a implementar, equipos a adquirir, cambios a efectuar, selección de tecnología susceptible a incorporar o cambiar, entre otros. De manera que el diagnóstico de la planta viene a ser un requisito para contar con información necesaria para la matriz de decisión, para alcanzar una con sustento y transparencia. A continuación se muestra una tabla con el diagnóstico de la planta de tratamiento, que servirá para la matriz de decisión en el ítem de evaluación de tecnología.

Tabla XLII. Diagnóstico cualitativo y cuantitativo de la PTAR de la USAC

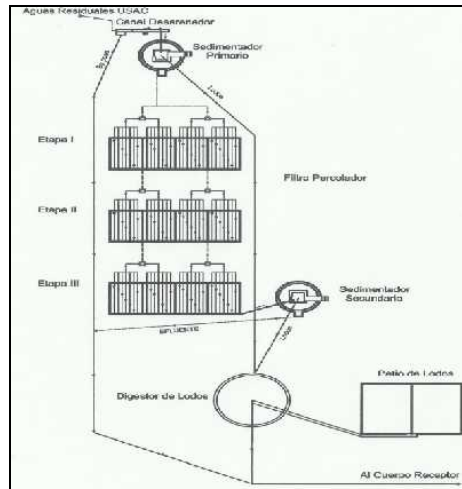
<b>Ubicación:</b>	<u>Zona 12, Campus Central Universidad de San Carlos</u>		
<b>Municipalidad:</b>	<u>Guatemala</u>	<b>Departamento:</b>	<u>Guatemala</u>
<b>Latitud:</b>	<u>14° 34' 43.70"</u>	<b>Longitud:</b>	<u>90° 33' 34.75"</u> <b>Altitud:</b> <u>1456</u>
<u>m.s.n.m.</u>			
<b>Fecha:</b>	<u>01/05/2017</u>		
<b>Nombre del Evaluador:</b>	<u>Ing. Alejandro Rojas Rodríguez</u>		
<b>Instrucciones:</b>	Completar el siguiente formulario, colocando una X en las casillas correspondientes y proporcionar información escrita cuando corresponda.		
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>			
<b>1. Nombre del proyecto a evaluar:</b>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Campus Central.		
<b>2. Nombre del operador de la PTAR</b>	Sr. Arturo González		
<b>3. Teléfono: -</b>	<b>Email: -</b>		
<b>4 Dirección del proyecto:</b>	Esta planta queda ubicada dentro de la granja experimental del campus central de la Universidad, zona 12.		
<b>5 Dirección para recibir notificaciones:</b>	Edificio de la Dirección de Proyectos Urbanización Ciudad Universitaria y Plan General de Remodelaciones, ubicado en la Ciudad Universitaria del campus central, zona 12.		

Continuación de la tabla XLII.

**6. Breve descripción del Proyecto:**

La planta de tratamiento fue diseñada por el Ing. Arturo Pazos en el año 1989, como un sistema de tratamiento biológico de un filtro percolador de tres etapas en serie, con una capacidad para 50,000 estudiantes. Fue construida por la Compañía Constructora de Obras Civiles (COCISA) en el año 1990.

**7. Flujo grama de los procesos de tratamiento**



**8. Describir las unidades o procesos principales de la PTAR**

La planta de tratamiento consta de una tecnología de filtros percoladores, la cual se basa en un proceso físico y biológico, aerobio. Las unidades que componen esta planta de tratamiento son las siguientes:

- Cámara de ingreso con su respectivo derivador de demasías "By Pass"
- Rejillas separadoras
- Canal desarenador
- Sedimentador primario
- Filtro percolador (de tres etapas en serie)
- Sedimentador secundario
- Digestor de lodos y patio de secado

Previo a estas unidades de la PTAR se encuentra la red de alcantarillado interna de la universidad, que logra captar, canalizar y conducir todas las aguas hasta la cámara de ingreso de la planta de tratamiento.

Todo esto se puede estudiar y ver más detalladamente en el ítem 2.4 "Universo de Trabajo" de este mismo trabajo.

**9. Área total del terreno en m<sup>2</sup>, incluir un plano o mapa de localización**

El área total del terreno donde se ubica la PTAR es de 5683,29 m<sup>2</sup>. Para una mejor descripción, en los anexos se adjuntan ciertos planos y un mapa de ubicación.



Continuación de la tabla XLII.

<p><b>10. Características topográficas del terreno: plano, inclinado, entre otros.</b>                  El terreno donde se ubica la planta es irregular e inclinado. Estas características favorecieron para diseñar una PTAR con una tecnología que trabajará a gravedad y sin dependencia de energía. Actualmente el terreno donde se ubica la planta es de alta vulnerabilidad de deslizamiento, producto del socavamiento que está generando el río en la parte baja, lo que lo convierte en un terreno de poco aprovechamiento para cualquier tipo de actividad.</p>	
<p><b>11. Actividades colindantes a la PTAR:</b>                  NORTE: <u>Granja experimental</u> SUR: <u>Granja experimental</u>                  ESTE: <u>Granja experimental</u> OESTE: <u>Colonia Monte María y Quebrada de Río</u></p>	
<p><b>12. Está en funcionamiento la PTAR</b> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> PARCIAL <input type="checkbox"/></p>	
<p><b>13. Identificación y características del cuerpo receptor:</b>                  El cuerpo receptor al cual se vierte el agua tratada proveniente de la PTAR es una quebrada afluyente al Río el Frutal.</p>	
<p><b>14. Riesgos potenciales en el área:</b></p> <p>a) Inundación <input type="checkbox"/> b) Incendio <input type="checkbox"/> c) Deslizamientos <input checked="" type="checkbox"/>                  d) Derrame de combustible <input type="checkbox"/> e) Otros, especifique: <u>Robos por el hampa.</u></p>	
<p><b>2. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO:</b></p>	
<p><b>2.1 Estimación del caudal (aforo) por m<sup>3</sup>/día o l/día de la PTAR:</b>                  Método: <u>medición de flujo en un drenaje de 0.29 mts. de diámetro.</u> Cantidad: <u>336096 l/día</u></p>	
<p>a) <b>Estimación de la cantidad de población que cubre la PTAR</b></p> <p style="text-align: center;"><u>Nota:</u> el caudal medio de diseño de la PTAR es de 9 l/s, por lo que tiene la capacidad de cubrir a 22870 personas.</p>	
<p><b>2.2 Generación de aguas residuales (aguas negras) (según origen)</b></p> <p>a) Domésticas <input checked="" type="checkbox"/> c) Otros, especifique:                  b) Industriales <input type="checkbox"/></p>	
<p><b>2.3 Sistema de tratamiento de aguas residuales (ej. pretratamiento, tratamiento primario, secundario terciario) (especificar adjuntando planos o esquemas, mediciones, entre otros)</b>                  El sistema de tratamiento al que se somete el agua residual es un sistema aerobio de filtros percoladores compuesto por un pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario, aunado el gestor anaerobio y patio de secado de lodos. En los anexos se puede observar planos de la planta de tratamiento.</p>	
<p><b>2.4 Descarga final de aguas residuales (efluente) a cuerpo receptor (ej. Pozo de absorción, drenaje municipal, río, mar, entre otros)</b>                  La descarga del agua tratada (efluente) se hace sobre una quebrada afluyente al río el frutal. Para esto es indispensable que el agua vertida cumpla con todos los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos indicados en la norma COGUANOR 236-2006.</p>	

Continuación de la tabla XLII.

<b>2.5 Disposición de lodos provenientes del sistema de tratamiento.</b> Una vez el lodo ha sido digerido y secado por el sistema de tratamiento, se le paga a una empresa certificada para que recoja y disponga de él correctamente, bajo las normas y regulaciones ambientales vigentes.
<b>2.6 Aguas de lluvia (captación y disposición de las mismas)</b> El campus central de la Universidad de San Carlos cuenta con un único drenaje (drenaje combinado) que recolecta todas las aguas residuales y pluviales del campus y las conduce hacia la PTAR. Aunque no es lo más indicado, esta trata los dos caudales y en época lluviosa aumenta considerablemente el caudal de ingreso (afluente).
<b>2.7 Personas beneficiadas y/o afectadas (si no se cuenta con censo realizar una estimación)</b> Las personas beneficiadas son todos aquellos estudiantes, catedráticos, personal administrativo y de campo del campus central de la Universidad. Esta PTAR tiene la capacidad de beneficiar aproximadamente a 22870 personas por día.
<b>2.8 Con respecto a la operación y mantenimiento:</b> Cuenta con operadores: <u>Sí</u> No. de operadores: <u>3</u> Están capacitados: <u>No</u> Tipo de capacitación: <u>Ninguna</u>  Cuentan con el Manual de Operación y Mantenimiento: <u>No</u>  Tienen tarifa establecida: <u>No, por ser la PTAR de la Universidad.</u> Costo de tratamiento: <u>Q34.961,69</u> /mes
<b>3. Efectos sobre la salud humana</b>
<b>3.1 Efectos en la salud humana:</b>
a) La actividad no representa riesgo a la salud de pobladores cercanos al sitio del proyecto <input checked="" type="checkbox"/>
b) La actividad provoca un grado leve de molestia y riesgo a la salud de pobladores <input type="checkbox"/>
c) La actividad provoca grandes molestias y gran riesgo a la salud de pobladores <input type="checkbox"/>
d) Efectos sobre los trabajadores. <input type="checkbox"/>
Especificar: _____
<b>3.2 ¿Qué medidas propone para evitar las molestias o daños a la salud de la población?</b> Se propone reutilizar el agua y el lodo tratado, como también aprovechar el biogás producido en el digestor de lodos de la PTAR. Con el fin de generar e incentivar una económica circular en la población estudiantil y minimizar los impactos al medio ambiente.

Fuente: elaboración propia, con datos modificados de la propuesta de Saturnino Ordóñez.

#### **3.4.4. Evaluación de tecnología de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos**

La evaluación de la tecnología de un sistema de tratamiento de aguas residuales permite tomar una decisión adecuada en función de las necesidades de los involucrados y del entorno. Dado esto, es necesario apoyar la toma de decisiones con herramientas que permitan identificar y realizar las comparaciones en una forma sencilla, objetiva, económico, todo con base en conocimientos generales sobre el proyecto y los procesos de tratamiento involucrados.

La técnica de evaluación propuesta en esta investigación para ayudar a mejorar o escoger un sistema de tratamiento desde el punto de vista técnico se basa en una matriz de decisión o de evaluación tecnológica. Esta matriz correlaciona los distintos aspectos que pueden ser evaluados en un proceso de tratamiento de agua bajo una determinada circunstancia de aplicación mediante la asignación de calificaciones en diversos rubros, según el diagnóstico realizado previamente y los criterios del o los evaluadores. Los rubros reciben una ponderación según su importancia, en función de cada caso de evaluación. Esta técnica permite que una evaluación de tipo cualitativo tienda a ser más objetiva para todos los involucrados.

La matriz de decisión o de evaluación tecnológica propuesta considera y pondera en la toma de decisión de los siguientes rubros: aplicabilidad del proceso, la generación de residuos, la aceptación por parte de la comunidad, la generación de subproductos con valor económico o de uso, la vida útil, el requerimiento de área, costo de inversión inicial, costo de operación y mantenimiento, el requerimiento de reactivos si el proceso lo amerita, aspectos de diseño, construcción y operación, así como la influencia sobre el entorno e

impacto al medio ambiente. A continuación se muestra la matriz descrita anteriormente aplicada a la PTAR de la Universidad de San Carlos en estudio.

**Tabla XLIII. Matriz de evaluación tecnológica para la PTAR de la USAC**

No.	A	B	C	D	E
	%	Proceso Evaluado: Filtro Percoladores PTAR's: Universidad de San Carlos de Guatemala Rubros evaluados:	CLASIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 3=adecuado 5=muy bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	D*A
1	5%	<b>APLICABILIDAD DEL PROCESO</b>	5	1	5
2	10%	<b>GENERACIÓN DE RESIDUOS</b>	3	0,6	6
3	5%	<b>ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD</b>	5	1	5
4	5%	<b>GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONOMICO DE REUSO</b>	5	1	5
5	15%	<b>VIDA ÚTIL</b>	5	1	15
6	5%	<b>REQUERIMIENTO DE ÁREA</b>	3	0,6	3
7	20%	<b>COSTO</b>			
7,1	-	Inversión	3		
7,2	-	Operación y Mantenimiento	5		
7,3	-	Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 10. El resultado anotararlo en la casilla 7.3 D	-	0,8	16
8	10%	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>			
8,1	-	Criterios de diseño	5		
8,2	-	Experiencia del contratista	3		
8,3	-	Tecnología ampliamente probada	5		
8,4	-	Complejidad en la construcción y equipamiento	3		
8,5	-	Sumar las casillas 8.1C, 8.2C, 8.3C y 8.4C dividir el total entre 20. El resultado anotararlo en la casilla 8.5D		0,8	8
9	20%	<b>OPERACIÓN</b>			
9,1	-	Flexibilidad de operación	5		
9,2	-	Confiabilidad del proceso	5		
9,3	-	Complejidad de operación del proceso	5		
9,4	-	Requerimiento de personal	3		
9,5	-	Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	5		
9,6	-	Sumar las casillas 9.1C, 9.2C, 9.3C, 9.4C y 9.5C y dividir el total entre 25. El resultado anotararlo en la casilla 9.6 D		0,92	18,4
10	5%	<b>ENTORNO</b>			
10,1	-	Influencia de la temperatura	1		
10,2	-	Producción de ruido	5		
10,3	-	Contaminacion visual	5		
10,4	-	Producción de malos olores	3		
10,5	-	Generación de gases efecto invernadero (huella de carbono)	1		
10,6	-	Condiciones para la reproducción de animales dañinos	5		
10,7	-	Suamar las casillas 10.1C, y 10.2C, 10.3C, 10.4C y 10.5C y 10.6 y dividir el total entre 30. El resultado anotararlo en la casilla 10.7D		0,67	3,3
11	100%	<b>SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11E</b>			84,7

Fuente: elaboración propia, con datos modificados de la propuesta de Saturnino Ordóñez.

### **3.4.5. Factibilidad técnica**

La factibilidad técnica debe considerar los siguientes factores clave:

- Selección del sitio de emplazamiento y diseño de la PTAR.
  - La disponibilidad del terreno de emplazamiento de la PTAR, de acuerdo con las dimensiones de diseño.
  - La cercanía a las viviendas y la dirección predominante de los vientos (para evitar los malos olores).
  - La topografía y desnivel del terreno, de manera que se facilite el transporte de las aguas procedentes de la red de alcantarillado hacia la PTAR, con el menor uso de energía posible.
  - Altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, iluminación y radiación solar.
  - Nivel freático, para definir las medidas de protección necesarias.
  - Procedencia (doméstica, industrial, entre otras) y características (DBO, nutrientes, temperatura, entre otros) del agua residual para la selección del tipo de tratamiento.
  
- Determinación del reuso potencial de las aguas residuales tratadas:
  - La estimación del caudal potencial para aprovechamiento.
  - La demanda de calidad del efluente de acuerdo con el uso previsto y en función a la normativa vigente.
  - La disponibilidad del sitio para la disposición o compostaje de lodos.



## 4. RESULTADOS

En la tabla XLIV se puede observar una síntesis del análisis del ciclo de vida (ACV) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos.

Tabla XLIV. **Resultado final del análisis del ciclo de vida de la PTAR de la USAC**

ACV	Social	Económico	Ambiental	Técnico
<b>Ponderación final</b>	Aceptable (62,5 %)	-	-	-
<b>Costo por m<sup>3</sup> tratado</b>	-	Q1,45	-	-
<b>Área requerida por m<sup>3</sup> tratados al mes</b>	-	0,24 m <sup>2</sup>	-	-
<b>CML 2001</b>				
<b>Agotamiento recursos abióticos</b>	-	-	0 MJ/ m <sup>3</sup> 0*	-
<b>Cambio climático</b>	-	-	(0,2563 Kg eq CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) 5,819E-15*	-
<b>Eutrofización</b>	-	-	(0,0336 kg eq PO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ) 2,531E-13*	-
<b>ICC</b>				
<b>Índice de carga contaminante</b>	-	-	Contaminada (56,21)	-
<b>Nota porcentual final</b>	-	-	-	84.7 %
*Los valores obtenidos en el ACV ambiental son valores adimensionales para que puedan ser comparados.				

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1. Análisis del ciclo de vida social

Los datos de los encuestados cuyo resultado es una evaluación de impactos con una ponderación final aceptable (62.5 %) para la planta de tratamiento, indican que la categoría de impacto denominada “trabajadores” fue la mejor ponderada, siguiéndole las categorías de “usuarios” y “proveedores”, y por último con una ponderación desfavorable y sin datos registrados en el tiempo debido que no se tiene ningún sistema de reuso de los subproductos de la planta (agua tratada y lodo digerido) se tuvo la categoría de “consumidores”.

Los impactos sociales coligados al proceso de tratamiento de las aguas residuales son relativamente bajos, generando una disconformidad despreciable de los involucrados directos e indirectos, que conlleve a problemas sociales suficientes como para la suspensión o cierre operacional de la planta. Todo esto da como resultado un análisis de ciclo de vida social para la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos, con una ponderación final aceptable.

Figura 32. Ponderación final de las categorías ACV social



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.



## **4.2. Análisis económico**

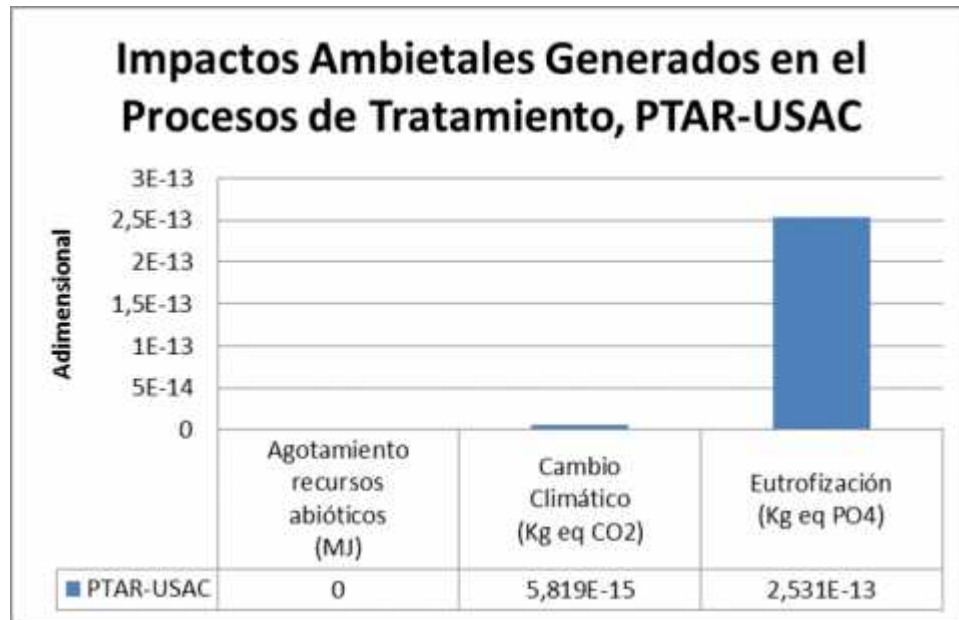
El resultado final en el aspecto económico dio un costo de Q1,45 por metro cúbico. Tomando en consideración los costos y valores mensuales de los siguientes tres ítems: operación y mantenimiento (Q 34.961,29), recuperación de la inversión inicial (Q 5461,69), y caudal medio de diseño de la PTAR (9 L/s).

Adicionalmente, la PTAR requiere un área de 0,24 m<sup>2</sup> para tratar un caudal de 9 L/s que podrían ingresar a la planta.

## **4.3. Análisis del ciclo de vida ambiental**

Los resultados de la evaluación de impactos ambientales de la PTAR de la Universidad de San Carlos, bajo la metodología CML 2001 se muestran en la siguiente figura.

Figura 33. Impactos generados en la PTAR, producto del proceso de tratamiento del agua, metodología CML 2001



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Respecto de la metodología del ICC, el agua tratada obtuvo una nota de 56,21; catalogada dentro de la escala como un agua contaminada con un código de color “amarillo”.

#### 4.4. Análisis técnico

La evaluación de tecnología de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala obtuvo un nota de 84.7 %, dado que el proceso es de fácil aplicabilidad, tiene buena aceptación por parte de la comunidad, una generación de subproductos con valor económico de reuso, una vida útil idónea, los costos de inversión inicial, y operación y mantenimiento son sostenibles, los criterios de diseño fueron acertados, se utilizó una tecnología

ampliamente probada, no genera ruido y la actividad no representa riesgo a la salud de pobladores cercanos al sitio del proyecto.



## **5. INTEPRETACIÓN DE RESULTADOS**

### **5.1. Análisis del ciclo de vida social**

Se realizó el análisis del ciclo de vida social en relación con los trabajadores, usuarios, consumidores y proveedores.

#### **5.1.1. Trabajadores**

Interpretando los resultados más a detalle se puede decir que los resultados de rendimiento de las horas de trabajo por parte de los trabajadores fueron clasificados como excelentes. El promedio de horas trabajadas en las instalaciones está por debajo (40 horas) de la jornada de trabajo máxima (48 horas) establecida en Guatemala por el Código de Trabajo.

Si se analiza lo ideal y más recomendable, que la planta de tratamiento contara con operadores las 24 horas del día, se requeriría una mayor cantidad de ellos, para que laboren en las dos jornadas (diurna y nocturna), así como rotar en vacaciones y fines de semana. Sin ser obligados los operadores actuales a trabajar en diferentes turnos, incrementando las horas de trabajo a una cantidad mayor a la máxima, establecida por el Código de Trabajo.

El indicador de salud y seguridad obtuvo un nivel aceptable. Se encontró que los trabajadores en las instalaciones están expuestos a poco riesgo, no hay presencia de ruidos altos por máquinas o equipos; el trabajo físicamente no es muy demandante y la incidencia de accidentes laborales es mínima.

A lo que sí están más expuestos los trabajadores de la planta es a malos olores y al desempeño de actividades laborales en lugares poco higiénicos. Sí es importante poner mayor atención a las calzadas resbaladizas, caídas a desnivel y a la seguridad contra el hampa de la zona. Como resultado, los trabajadores pueden sufrir accidentes de trabajo y enfermedades, lo cual los pone en un riesgo laboral más alto que el promedio en otro tipo de ocupaciones.

En relación con los indicadores de libertad de asociación colectiva y beneficios sociales, se obtuvo una puntuación aceptable. Los trabajadores reciben vacaciones pagadas y días de feriado, beneficios médicos y dentales, seguro social (IGSS) y pensiones de jubilación. Así como libertad de asociación a sindicatos u otros gremios de ayuda y apoyo al trabajador.

En relación con el salario justo, el resultado del rendimiento fue clasificado como aceptable, debido que el sueldo percibido por los trabajadores se encuentra por encima del salario justo mínimo en Guatemala, así como también por encima de la preparación académica que tienen y con la que llegan a laborar a la planta.

De acuerdo con la disponibilidad de la documentación de la PTAR, los trabajadores tienen acceso a cierta documentación (planos, planes de formación, y otros) siempre y cuando la soliciten a su jefatura. Sin embargo existe otra documentación, como es el caso de memorias y estudios técnicos, y manuales de operación y mantenimiento que no están disponibles para todo el personal, o no existen del todo. El indicador de capacitación obtuvo un nivel de muy pobre, ya que no existe ningún plan de capacitación ni formación del personal en el ámbito técnico, que les permita aprender y obtener mayores habilidades en las actividades rutinarias de la planta de tratamiento.

Respecto del programa de monitoreo llevado a cabo, la instalación obtuvo una evaluación baja, ya que las acciones por parte de la Universidad de San Carlos y de las instituciones gubernamentales no han sido eficientes, en relación con la fiscalización ambiental. Por lo tanto, es necesario implementar un plan de monitoreo constante y estricto en la planta para supervisar, controlar, regular y hacer cumplir el reglamento, normas vigentes y el marco institucional de Guatemala, con el fin de impulsar el desarrollo del sector del saneamiento y preservar los cuerpos de agua.

Respecto del indicador de materiales y equipo se obtuvo una puntuación que dio un resultado bajo. Si bien a los trabajadores se les brinda uniforme, equipo básico tanto para la protección personal como para desempeñar ciertas labores en la PTAR, se ve una falta notable de herramienta y materiales necesario para la operación y mantenimiento adecuado de la misma. También existe un presupuesto que según el administrador es un poco limitado; pero como la planta está manejando actualmente caudales bajos respecto de su capacidad, la ausencia de materiales y equipos y el presupuesto limitado no se ve reflejado tan perjudicialmente en la eficiencia de la misma.

### **5.1.2. Usuarios**

De acuerdo con la metodología propuesta, la evaluación de la seguridad y las condiciones de vida saludable muestran un rendimiento excelente de la PTAR. La planta reunió los requisitos mínimos de garantía a las condiciones de vida seguras para los vecinos y pobladores cercanos. No se encontraron quejas relacionadas con efectos en la salud durante las entrevistas.

Los resultados de compromiso de la comunidad y aceptación social, se examinaron conjuntamente, ya que tienen un origen común.

Para la PTAR, el compromiso de la comunidad fue clasificado como aceptable y su aprobación social como excelente. La mayoría de los entrevistados poseen cierta conciencia ambiental que los lleva a relacionar el medio ambiente o la contaminación con la problemática del tratamiento de las aguas residuales, lo cual es bueno. También es importante mencionar que en esta evaluación se obtuvieron puntajes altos debido al compromiso de la universidad por el tratamiento de las aguas residuales y la preservación del medio ambiente, que en este caso específico de estudio es a la que le cae la responsabilidad del tratamiento.

El indicador de empleo local se encontró como aceptable; este valor se debe a que los trabajadores viven en zonas no tan lejanas de la planta. Los servicios de empleo local desempeñan un papel integral en la creación de estrategias y aumentan la contribución al desarrollo económico y calidad de vida de la zona y/o comunidad.

La PTAR, en relación con el compromiso público con temas de sustentabilidad, consiguió un valor excelente, ya que los entrevistados están conscientes de la necesidad de pagar un monto justo por el tratamiento de las aguas residuales, y también tienen cierto interés en temas relacionados con los problemas del agua y el cuidado de la misma.

### **5.1.3. Consumidores**

Al no hacer reuso alguno de las aguas residuales de la planta de tratamiento, la categoría de consumidores y sus respectivos indicadores no presentan datos de referencia, generando con esto un impacto sustancial en la ponderación final del análisis de ciclo vida social de la misma.



#### **5.1.4. Proveedores**

Los indicadores evaluados para esta categoría fueron: la competencia justa, las relaciones con los proveedores y la promoción de la responsabilidad social. En la planta de tratamiento los proveedores son contratados por la Universidad de San Carlos, respaldando y cumpliendo la ley de contrataciones públicas. Dado el caso de algún material o producto específico se realiza la licitación y concurso de acuerdo con la ley vigente, por lo tanto, el indicador de la competencia justa fue clasificado como aceptable.

El indicador de relaciones con los proveedores se evaluó como excelente, debido que no existe ni ha existido algún problema en relación con las contrataciones y adjudicaciones de proveedores de la PTAR. Adicional, no existen datos respecto de la promoción de la responsabilidad social, debido a que no hay información suficiente de los proveedores en relación con el tema.

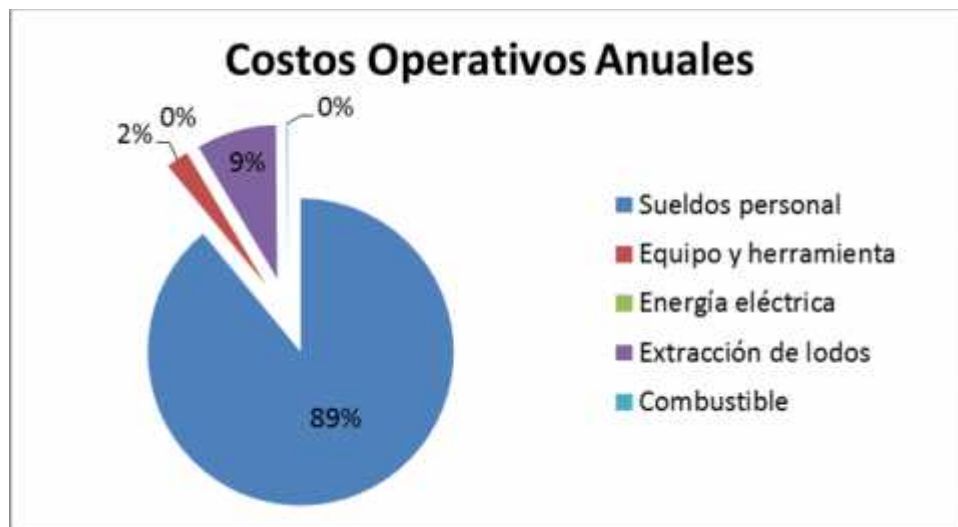
#### **5.2. Análisis económico**

Es crucial que los costos del sistema de tratamiento de aguas residuales tengan una íntima relación de sostenibilidad respecto del caudal mensual tratado en la planta y las finanzas de la universidad. Es por esto que la interpretación y el análisis de los costos asociados a la PTAR es fundamental para entender y mantener el funcionamiento de la misma.

Respecto de la inversión, se obtuvo un costo equivalente al día de hoy de Q 7.701.565,71; el cual es bajo en comparación con tecnologías como la de lodos activados. Una ventaja de esta tecnología de filtros percoladores sin recirculación es que no requerir equipo mecánico ni eléctrico especializado, por lo que permite recortar costos de inversión.

También, a partir del análisis económico se determinaron los costos operativos anuales; en la figura 32 se observa la distribución de los mismos. En ella se identifica que el costo más importante está asociado con los sueldos del personal, ya que supone aproximadamente el 89 % del total. Esto es un comportamiento muy típico de esta planta donde está exento el consumo de productos químicos y de energía, que generalmente son de los costos más significativos.

Figura 34. **Costos operativos anuales de la PTAR-USAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Más detalladamente, los costos operativos arrojan un monto mensual de Q 34.961,69; asumiendo que aún se involucran los costos de la recuperación de inversión; sin embargo, este podría ser Q 5.461,69 menos si no se toma en consideración. Ese monto convierte el costo por metro cúbico tratado de agua residual en un monto de Q1,45; tomando en consideración el caudal medio (9 L/s) para el cual la PTAR fue diseñada, se concluye que es un monto bajo comparado con una tecnología como lodos activados, y normal en relación con

tecnologías como los reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) o lagunas de estabilización.

Por otro lado, es importante considerar que la planta se mantiene sin ningún tipo de equipo y maquinaria que requiera reparación y mantenimiento técnico y/o especializado, por lo que no requiere prestadores de servicios expertos en temas técnicos. Todo esto evita el incremento de los costos de operación y mantenimiento, y a mantener un sistema de tratamiento sostenible en el tiempo.

Es importante mencionar que la sostenibilidad financiera define la capacidad de la universidad como entidad encargada del servicio, de garantizar el funcionamiento y la prestación de dicho servicio de manera continua y eficiente, garantizando que los recursos económicos que ingresen (matrícula, presupuesto nacional, subsidios, tasas, entre otros) de acuerdo con las diferentes variables del departamento financiero de la universidad, cubran sus costos. En esta perspectiva, para garantizar la sostenibilidad financiera se debe:

- Asegurar que los ingresos cubran los costos/gastos (ingresos > egresos), En este caso la sostenibilidad de la PTAR de la ciudad universitaria se basa en el subsidio, ya que es un servicio que se debe hacer y por el cual no se le cobra a los usuarios-estudiantes.
- Generar ingresos que cubran de manera oportuna los costos/gastos, estos ingresos en específico se perciben mayoritariamente del presupuesto nacional asignado a la educación.
- Identificar todos los costos/gastos de funcionamiento.

- Promover una administración eficiente, efectiva y transparente.

Tomando en consideración lo anterior se ha podido garantizar el funcionamiento eficaz de la planta en el tiempo.

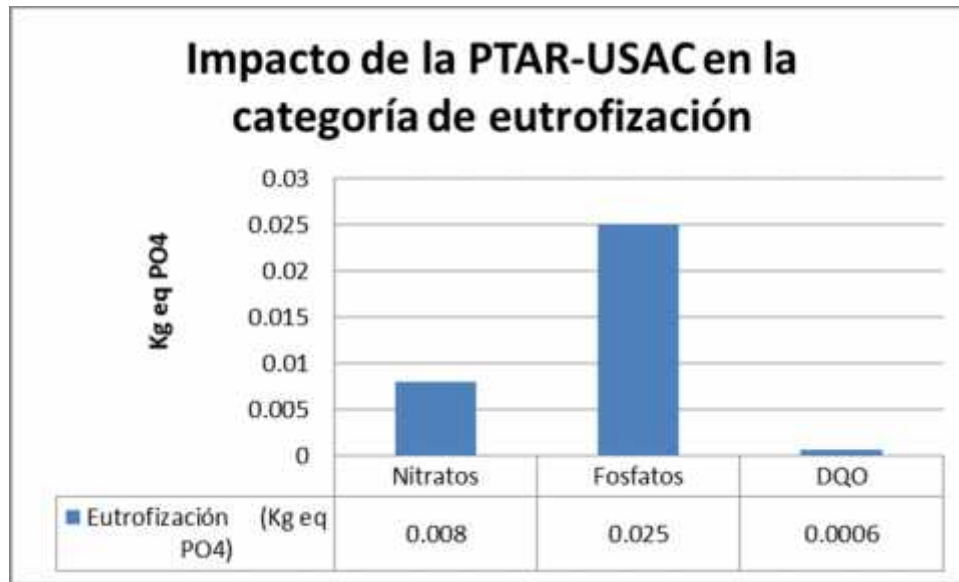
Otro aspecto relevante y que el análisis económico lo muestra, es en relación con la valorización económica de los subproductos (biogás, agua tratada y lodo digerido). A pesar de la buena calidad del agua tratada y del lodo digerido, esta PTAR no realiza ni tiene algún plan de aprovechamiento de los subproductos que permita percibir ingresos económicos para el amortiguamiento de los costos de operación y mantenimiento. Aspecto desfavorable conociendo las facilidades promocionales, los grandes beneficios y el aporte que puedan tener en áreas como las de jardinería o la granja experimental de la misma ciudad universitaria.

### **5.3. Análisis del ciclo de vida ambiental**

De acuerdo con los impactos ambientales evaluados en la PTAR de la ciudad universitaria, la eutrofización es el que tiene un mayor peso; esto debido a que el sistema de tratamiento se compone de un proceso aerobio que ayuda a la nitrificación del agua durante el recorrido de la misma por las diferentes unidades de tratamiento de la planta. En relación con esto, se propicia el incremento de algunos otros impactos como la ecotoxicidad acuática.

Más en detalle, se puede observar en la figura 34 cómo los fosfatos constituyen el principal componente del incremento de la eutrofización, lo cual concuerda y tiene relación con Hospido (2007), donde se informó que el fósforo es una de las sustancias principales de impacto en la categoría de eutrofización.

Figura 35. **Indicadores de impacto de la categoría de eutrofización**



Fuente: elaboración propia, utilizando Excel.

Respecto de la disminución de los recursos abióticos, la categoría de agotamiento de recursos abióticos no tuvo impactos, ya que en la PTAR no llega el servicio eléctrico ni se utiliza energía para ningún proceso de operación. Esta categoría se evaluó usando el método de línea de base descrito por CML (2013), tomando como referencia las reservas finales y las tasas de extracción. Los resultados se expresan como combustibles fósiles consumidos y se indican en equivalentes de MJ por 1 m<sup>3</sup>.

En cuanto al calentamiento global, los resultados con un horizonte de 100 años, muestran que la PTAR genera 0.256 kg de CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>3</sup>, que corresponde a aproximadamente 31445.12 Kg de CO<sub>2</sub> eq. al año. Esto hace la tercera categoría de mayor impacto. Este impacto está asociado principalmente a la producción de CH<sub>4</sub> (metano) en el subsistema 3, debido al biogás

producido en la digestión anaerobia por el manejo de biosólidos y la inexistencia de un programa de recuperación del mismo para la generación de electricidad.

De acuerdo con el análisis realizado, el subsistema 3 (digestor y secado de lodos) es el que más contribuye a los efectos del calentamiento global, seguido por el subsistema 1 (pretratamiento y tratamiento primario).

Es importante mencionar que las emisiones de gases de efecto invernadero están principalmente relacionadas con el consumo de energía. Por lo que este sistema y tecnología de tratamiento que no contempla energía para su operación, reduce el impacto ambiental en la categoría de cambio climático, más aún, si se compara con tecnologías como lodos activados o cualquier otra dependiente de energía para su buen funcionamiento. Por otro lado, el resultado de la evaluación de impactos de la PTAR de la Universidad de San Carlos, bajo la metodología ICC muestra que el efluente de la planta es agua contaminada, donde los coliformes fecales y los valores de potencial de hidrogeno son los más influyentes en este resultado.

#### **5.4. Análisis técnico**

El análisis técnico permitió evaluar la planta de tratamiento de la universidad en tres grandes temas: operación y mantenimiento, eficiencia, e integridad de la tecnología con sus respectivos beneficios y/o desbeneficios.

Primeramente se identifica que la PTAR no cuenta con un manual de operación y mantenimiento en el cual los trabajadores y personal administrativo se puedan apoyar, tanto para el funcionamiento de la planta como para la administración idónea de la planta. Lo que lleva a una deficiencia de la planta y un desconocimiento amplio de los operadores en la operación y mantenimiento

correcto de las unidades, caudales mínimos, medios y máximos de la planta, parámetros importantes de medición, control y frecuencia de medición de los mismos, manejo y alternabilidad de las unidades para remoción de impurezas o limpieza en general.

En cuanto a las características del afluente se pudo identificar que las aguas residuales tienen similitud con las aguas residuales de origen doméstico (de concentración media y alta), por lo que la tecnología seleccionada de filtros percoladores se desempeña bien. El pH tiende a ser neutro y el oxígeno disuelto bajo, características comunes de un agua residual con exceso de materia orgánica. No hay descargas industriales pero sí existen descargas provenientes de laboratorios químicos que pueden estar alterando las características del agua.

Respecto del efluente se pudo observar que la DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos, coliformes fecales y pH disminuyeron, mientras que el oxígeno disuelto aumentó conforme el agua pasaba secuencialmente por cada unidad de tratamiento, algo que se espera de un agua sometida a un proceso de tratamiento que tiene como objetivo mejorar sus propiedades fisicoquímicas y biológicas en pro del medio ambiente y la salud pública. Por otro lado, al utilizar la planta de tratamiento un proceso aerobio con tecnología de filtros percoladores, los nitratos y fosfatos tendieron a incrementarse sustancialmente, generando una eutrofización al cuerpo receptor y por tanto puntos desfavorables al sistema de tratamiento como tal.

En relación con las eficiencias, se obtuvieron resultados excelentes en los diferentes parámetros (DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos y coliformes fecales), arriba del 95 por ciento. Estas eficiencias óptimas se obtienen principalmente debido a dos aspectos: la tecnología de filtropercoladores que permite soportar

diferentes variaciones de caudal y el caudal bajo de agua residual que ingresa con relación al máximo de la planta.

Es importante mencionar que la tecnología seleccionada de acuerdo con el tipo y origen del agua, la inversión inicial, el presupuesto para la operación y mantenimiento asignado, el terreno disponible, la topografía irregular y la capacidad técnica de los operadores, fue la idónea para ser adaptada e implementada con éxito, situación que ha llevado a que sea sostenible con el tiempo.

En la tecnología propuesta se favorece el tratamiento físico y biológico, con flujo por gravedad, sobre los tratamientos químicos y/o con requerimiento de energía para el buen funcionamiento. Estos aspectos disminuyen los costos y la complejidad de operación y mantenimiento, ya que no hay dependencia de energía, ni de productos (enzimas, bacterias o microorganismos de cualquier tipo) que deban agregarse a la planta frecuentemente y generar dependencia económica.

La planta de tratamiento genera lodos, que por su proceso de tratamiento (digestor anaerobio y patio de secado) se estima de buena calidad y susceptible a ser usado, pero a este lodo no se le da ningún tipo de aprovechamiento. Según la administración de la planta se contrata una empresa certificada que le da un manejo adecuado al lodo después del proceso de tratamiento mencionado, pero se sabe que lo ideal es darle una valorización y aprovechamiento como mejoradores de suelo o en la agricultura. Lo que sí es de rescatar es que la planta de tratamiento, preferentemente, integra el tratamiento de lodos por vía biológica.



Por otro lado, a pesar de componerse de un proceso aerobio, el sistema de tratamiento no contempla el control de olores que se genera ocasionalmente. Situación que se podría controlar a través una mejor operación y mantenimiento, y del aprovechamiento del biogás.

Si cabe señalar que es una planta que no genera ningún tipo de ruido que afecte a los trabajadores o a los pobladores cercanos.

Algo importante que se puede observar en esta planta de tratamiento y en las PTAR's de Guatemala en general, es que no tienen contemplado qué hacer con el agua residual o agua parcialmente tratada durante el arranque de la planta o falla de la misma, sin que afecte ostensiblemente al medio ambiente.

Debido que la planta está compuesta por un equipamiento de fácil compostura y reposición, no requiere personal altamente capacitado; es decir, puede ser operada por un profesional de nivel técnico medio con la capacitación necesaria.



## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de interpretar los resultados se hace necesario realizar un análisis que integre conjuntamente los aspectos e impactos técnicos, económicos, sociales y ambientales, con el fin de sopesar unos con otros, y así obtener una mejor visión de la PTAR, identificar posibles mejoras que eviten o minimicen los efectos adversos al medio ambiente, la operación, el mantenimiento y la sociedad, y hacer de este proceso de tratamiento lo más sostenible posible en el tiempo.

La PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala tiene un sistema y tecnología de tratamiento favorable a los diversos impactos que puede generar una planta de tratamiento. Obteniendo un impacto global positivo y equilibrado entre los diferentes aspectos (social, económico, ambiental y técnico).

Tiene una ponderación final en el aspecto social aceptable que conjuga con buenas eficiencias en la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, SS y CF, con costos operacionales y de mantenimiento, área requerida de tratamiento e impactos ambientales (excepto el índice de carga contaminante) bajos. Todo esto lo viene a reforzar y fundamentar la nota porcentual de 84,7 % obtenida en la evaluación tecnológica realizada a la PTAR dentro del análisis técnico del ACV (ver tabla XLII).

Existe una relación costo-beneficio en el ámbito económico y medio ambiental adecuado que representa una eficiente asignación de los recursos

escasos que se invierten, con el fin de minimizar los riesgos a la salud pública y al medio ambiente.

En el aspecto ambiental, el afluyente de la PTAR obtuvo un índice de carga contaminante con una nota de 56,21, dando como resultado un agua contaminada. Con este resultado el agua cumple con la normativa nacional para el vertimiento de aguas residuales a un cuerpo receptor e inclusive para el aprovechamiento en actividades como riego de zonas verdes o ciertos fines agrícolas en la granja experimental de la Universidad; sin embargo, podría mejorar la operación y mantenimiento en el aspecto técnico, así como implementar algún tratamiento terciario que permita obtener un agua con una nota aceptable, y por ende una mayor diversidad de alternativas para la reutilización del recurso.

A pesar del buen balance que obtuvo la PTAR en el ACV, se identificaron ciertas deficiencias, las cuales son importantes mencionar para plantear alternativas de mejora que busquen la excelencia de la misma. La primera de ellas es en el ámbito social, donde la PTAR no tiene ningún programa de capacitación que permita a los trabajadores tener un mayor conocimiento técnico para la operación y mantenimiento de la misma.

Es por esto que se plantea implementar un programa de enseñanza teórica y práctica con carácter constante e innovador que permita a los trabajadores en campo manipular y tener un mayor control de la planta ante las variaciones de caudal y calidad del agua. Adicional a esto y siempre dentro del mismo aspecto social, es fundamental suplir a los trabajadores de la planta con equipo de protección certificado y específico, acorde a las labores que realizan; así también contar con un botiquín y sistema de comunicación en caso de emergencia.

Por otro lado, dentro del aspecto ambiental es crucial iniciar un plan de aprovechamientos de los subproductos (biogás, agua y lodo tratado) que permita mitigar los impactos ambientales que la PTAR genera. Si bien es cierto son menores que los generados por otras tecnologías, no es un motivo para omitir implementar una economía circular con el agua residual, que conserva su valor a través del reuso y la reasignación.

Para esto es necesario realizar ciertos análisis de laboratorio (C.E, pH, Mg, Na, K, Cu, Zn, Fe, Mn, CF, entre otros.) al agua para determinar las características con fines de riego agrícola en general o para áreas verdes. La finalidad de la reutilización es disminuir los impactos ambientales (eutrofización y contaminación de carga contaminante) al cuerpo receptor y aumentar el rendimiento, aprovechando la materia orgánica y los nutrientes del agua residual para el uso agrícola y áreas verdes.

El reuso con fines agrícolas o de riego en áreas verdes que se le puede dar en la Universidad es considerado como una herramienta eficiente para la gestión del recurso hídrico, que se plantea como un complemento al servicio de abastecimiento, y así obtener una mayor regularidad que compense la escasez del recurso, por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta de otras fuentes de agua.

Del mismo modo se recomienda hacer el estudio para la reutilización del lodo generado en la planta de tratamiento con distintos fines, entre ellos: fertilizante orgánico, medio de cultivo, sustrato de mejoramiento del suelo, y para jardinería de la ciudad universitaria. El propósito del aprovechamiento del lodo es disminuir el uso, eventualmente, de fertilizantes.

Por su parte se plantea el aprovechamiento del biogás generado en el digestor anaerobio para la producción de energía, mediante la captación del

metano generado. Esto viene a eliminar los efectos al cambio climático que pueden generar esos gases de efecto invernadero, si se liberan a la atmósfera. Esto se hace cubriendo el digestor anaerobio con una membrana plástica y quemando el biogás.

Todo el aprovechamiento de estos tres subproductos (biogás, agua y lodo tratado) viene a reducir los impactos al ambiente con la reducción de la eutrofización, el cambio climático y la contaminación de carga contaminante al cuerpo receptor, como también a reducir los costos en el ámbito económico.

A modo de balance general, puede afirmarse que la implementación de un proceso de reutilización de los subproductos (biogás, agua y lodo tratado) sería sumamente benéfico para el medio ambiente en general y para el cuerpo receptor (quebrada afluyente al río El Frutal) en particular, superando notablemente los impactos negativos que su emplazamiento y operatoria producirían en este.

En el aspecto técnico se obtuvo una nota aceptable, sin embargo, es necesario tener un monitoreo estricto y constante del funcionamiento de la PTAR y la calidad del agua tratada. También realizar e implementar un manual de operación y mantenimiento que sirva de apoyo para los operadores y trabajadores involucrados en la planta, con instrucciones organizadas, redactadas a partir de los manuales e información técnica, de los diseños constructivos, proveedores, fabricantes y del afluyente, donde se indica el procedimiento correcto y los pasos que se deben seguir para cada actividad.

Esto conduce a una mayor conservación de los equipos mecánicos, aumento de la calidad del agua y de la productividad de la planta, disminución

de reparaciones o paralizaciones imprevistas, reducción eventualmente de horas extra de trabajo y reducción de costos.

En síntesis, puede verse que si se toma en consideración y se ejecuta lo propuesto anteriormente, va a haber un impacto positivo sobre los aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos, que van a conducir a la reducción de los impactos negativos que genera la PTAR, asociados al proceso de tratamiento.

Como se mencionó anteriormente, el enfoque del ciclo de vida permite crear comparaciones de sistemas completos, tal como se muestra en la tabla XLVI. Facilitando la toma de decisiones con una perspectiva a largo plazo o simplemente para generar criterios comparativos de diferentes tecnologías.

Tabla XLV. **Comparación de ACV's de diferentes tecnologías**

Categorías de impacto	Tecnología evaluada					
	Lodos Activados de AE	Lagunas de Estabilización	UASB+FP	Tratamiento Primario + Filtro Tamiz Rotativo	FP-USAC	
<b>Resultados Caracterizado</b>						
Cambio climático (Kg CO2 eq)	0,62373	0,67342	0,68871	0,97164	0,15185	0,25630
Eutrofización (Kg de PO4 eq)	0,01515	0,00346	0,00349	0,00247	0,02438	0,03360
<b>Resultado Normalizado</b>						
Cambio climático (Kg CO2 eq)					3,66E-15	5,819E-15
Eutrofización (Kg de PO4 eq)					1,84E-13	2,531E-13

Fuente: elaboración propia.





## CONCLUSIONES

1. La aplicación de la herramienta del ciclo de vida permite evaluar satisfactoriamente los aspectos e impactos técnicos, económicos, ambientales y sociales de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. El análisis del ciclo de vida social de la PTAR de la Universidad de San Carlos obtuvo una ponderación final aceptable (62.5 %). Indicando que la categoría de impacto denominada “usuarios” fue la mejor ponderada (90 %), siguiéndole las categorías de “trabajadores” (65,63 %), “proveedores” (58,33 %), y por último con una ponderación desfavorable y sin datos registrados en el tiempo; debido a que no se tiene ningún sistema de reuso de los subproductos de la planta (agua tratada y lodo digerido) se tuvo la categoría de “consumidores” (0 %).
3. En referencia al análisis económico, los resultados arrojan que el costo por metro cúbico de agua tratada es de Q1.45, tomando en consideración los costos de operación y mantenimiento, y los de amortización a la inversión inicial.
4. La evaluación ambiental dio como resultado que el índice de carga contaminante tiene un valor de 56,21 y catalogando al agua como contaminada es el impacto más relevante que genera la planta de tratamiento, seguido de los aportes a la eutrofización (0,036 kg eq  $PO_4/m^3$ ) y al cambio climático (0.2563 Kg eq  $CO_2/m^3$ ), mientras que la categoría de agotamiento de los recursos abióticos tiene un impacto nulo, ya que la

planta no utiliza energía para ninguna actividad operacional. Tomando en consideración lo anterior, se plantea aprovechar los subproductos (agua y lodos tratados y biogás generado), para reducir los impactos antes mencionados.

5. En cuanto al análisis técnico, diagnóstico y evaluación tecnológica de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se obtuvo un nota de 84,7 %.
6. La eficiencia del sistema de tratamiento es del 94,38 % en la remoción de la demanda química de oxígeno DQO; 97,12 % en la remoción de materia orgánica, DBO<sub>5</sub>; 97,25 % en la remoción de sólidos suspendidos, SS, y 99,26 % en la remoción de coliformes fecales.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario incrementar el conocimiento, la aceptación y la aplicación de la perspectiva del ciclo de vida (*Life Cycle Thinking*) y el ACV en los tratamientos de agua residual y administración de estos sistemas. Con el objetivo desarrollar e innovar sistemas integrales y sostenibles de tratamiento en el tiempo.
2. Es relevante buscar unificar formatos de datos, metodologías y crear un entorno de trabajo común para que los proyectos de ACV se lleven a cabo bajo las mismas directrices.
3. Para el empleo de los ACV en proyectos de tratamiento de aguas residuales es necesario plantear una metodología simplificada, disponer de bases de datos locales para el inventario, que permitan acercarse más a la realidad del caso en análisis.
4. Actualmente existe una amplia variedad de herramientas y softwares (Simpro, Gabi, Umberto, Cmlca 4.2, Team, entre otros) disponibles para llevar a cabo un ACV, las cuales tienen como componentes principales y prioritarios la presencia y variedad de base de datos (BBDD) y de metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV). Para esto es indispensable incentivar y desarrollar a nivel académico dentro de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos la enseñanza de estos softwares y metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida.

5. Con el fin de poder comparar, tener una mejor perspectiva y unificar datos relevantes, se recomienda que las investigaciones relacionadas al análisis del ciclo de vida (ACV) que se realicen en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) se desarrollen tomando en consideración la misma metodología de evaluación de impactos (CML 2001 e ICC) de este documento.
6. El análisis del ciclo de vida de un proceso o producto implica tomar en consideración la mayor cantidad de posibles impactos que puede generar dicho proceso o producto, por lo que se recomienda contar con un mayor presupuesto para realizar un ACV de la PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que contemple en el área ambiental categorías de impacto como, la ecotoxicidad, acidificación, destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana, *smog* fotoquímico, entre otras.
7. El desconocimiento mostrado por la comunidad estudiantil a la PTAR de la Universidad de San Carlos se puede mejorar buscando mecanismos que permitan hacer partícipe a la comunidad del tratamiento del agua residual; es decir se debe plantear una estrategia que involucre a ciertas Facultades relacionadas con el tema, que facilite el aprovechamiento de los subproductos, y que a su vez se pueda crear conciencia de la importancia de la misma para el medio ambiente y en general para el entorno, ya que si esta no existiera o no funcionara, la afectación a la calidad del agua de la quebrada y el río El Frutal sería mucho mayor y se podrían afectar diversas actividades aguas abajo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Banco de Guatemala. *Banguat*. [en línea]. Disponible en: <<http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/pim/pim01&e=112487&e=131767>>. [Consulta: abril de 2017].
2. BAUMANN, H. y TILLMAN, A.M. (2004). *The hitch hiker's guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur. Lund, Suecia.
3. BiskaiLab. (2012). *Metodología para el análisis de ciclo de vida de depuradoras de aguas residuales*. Universidad de Deusto.
4. BLANCO, D; COLLADO, S; DÍAZ, M; SUÁREZ, M; PÉREZ, J. & SÁNCHEZ, J. (marzo-abril de 2014). *Análisis de la huella de carbono en una planta de tratamiento de agua tipo carrusel*. Articulotécnicos. p. 52.
5. BLANK, L., & TARQUIN, A. (2006). *Ingeniería Económica* (Sexta ed.). (J. E. Brito, Trad.) McGraw-Hill.
6. Centre, I. D. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales en el contexto de cambio climático: gases de efecto invernadero y análisis de ciclo de vida*. (pp. 1-3).

7. DONADO H, R. (2013). *Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta*. Bogotá, Colombia.
8. FEIJOO G., HOSPIDO, A. y MOREIRA, M. T. (2007a). *Análisis del ciclo de vida (I). Desarrollo sostenible y ACV*. Ingeniería Química 443. pp 153-162.
9. FEIJOO G, S; GONZÁLEZ, A; GALLEGO, A; HOSPIDO, A y MOREIRA, M.T. (2007b). *Análisis del ciclo de vida (III). Caso práctico*. Ingeniería Química 445. pp. 96-102.
10. FEIJOO G, S; GONZÁLEZ, A; GALLEGO, A; HOSPIDO, A y MOREIRA, M.T. (2007c). *Análisis del ciclo de vida (II). Metodología y etapas*. Ingeniería Química 444. pp.114-125.
11. GALLEGO SCHMID, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología de análisis del ciclo de vida: Desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre*. Santiago, Compostela, España.
12. GARCÍA, J.; HERRERA, I., & RODRÍGUEZ, A. (2011). *Análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Caso: PTARM de Yautepec (Morelos, México)*. España: CIEMAT.
13. Gobierno de Guatemala. (s.f.). *Política nacional del sector de agua potable y saneamiento*.
14. GONZÁLEZ BENÍTEZ, M., GUARDINO FERRÉ, R., CALDERÓN IGLESIAS, R., & GRACIAS VILLAR, S. (enero-marzo de 2014). *El*

*análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas. AFINIDAD LXXI. pp. 38-42.*

15. \_\_\_\_\_. (23 de octubre de 2013). *El análisis de ciclo de vida como herramienta de sostenibilidad en proyectos de tratamientos de aguas. AFINIDAD LXXI, 5.*
16. HOSPIDO, A., MOREIRA, M., & FEIJOO, G. (13 de enero de 2008). A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia. *The International Journal of Life Cycle Assessment. 57-64.*
17. HUIJBREGTS M. A. J.; GILIJAMSE, W. RAGAS, M. J. y REIJNDERS, L. (2003). *Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling. Environmental Science & Technology 37. pp. 2600-2608.*
18. INHOBE. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Eusko Jaurlaritzza Gobierno Vasco, Bilbao.*
19. MERLI, G. (2014). *Propuesta de reutilización de las aguas residuales vertidas al estuario de Bahía Blanca. Bahía Blanca: edUTecNe.*
20. MUÑOZ ORTIZ, I. MOLINA DÍAZ, A., FERNÁNDEZ ALBA, A., & RODRÍGUEZ A, R. (s.f.). [www.consolider-tragua.com/](http://www.consolider-tragua.com/). [en línea]. Disponible en: <[http://www.consolidertragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/T\\_MU%C3%91OZ\\_ORTIZ\\_et\\_al.pdf](http://www.consolidertragua.com/eventos/ADECAGUA/COMUNICACIONES/T_MU%C3%91OZ_ORTIZ_et_al.pdf)>. [Consulta: 19 de julio de 2016].

21. MUNGKUNG, R. T., H. Udo de Haes y R. Clift (2005). Potentials and limitations of life cycle assessment in setting ecolabelling criteria: a case study of Thai shrimp aquaculture product. *International Journal of LCA* 11(1), 55-59.
22. NOYOLA, A., MORGAN SAGASTUME, J. M., & GÜERECA, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. UNAM: Instituto de Ingeniería, Ciudad de México.
23. NOYOLA ROBLES, A., GÜERECA HERNÁNDEZ, L. P., MORGAN SAGASTUME, J. M., HERNÁNDEZ PADILLA, F., PADILLA RIVERA, A., CARIUS, C., y otros. (2013). *Water and sanitation: lac cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources*. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad de México.
24. SONNEMANN, G. W., SCHUHMACHER, M. y CASTELLS, F. (2003). Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. *Journal of Cleaner Production* 11(3). 279-292.
25. PRATTI, L. y PAVANELLO, R. (1971). *Assesment of surface water quality by a single index of contamination*. Water Resources Research, Vol.5, May 1971. pp. 456-467.
26. POCH BARRERA, A. (2013). *Comparación medioambiental de dos plantas de producción de agua potable basada en el método ACV*. Barcelona, España.



27. POTTING, J., W. KLÖPFFER, J. SEPPÄLÄ, J. RISBEY, S. MEILINGUER, G. NORRIS, G. LINDFORDS, L. y M. GOEDKOOP, M. (2001). *Best available practice in life cycle assessment of climate change, stratospheric ozone depletion, photo-oxidant formation, acidification and eutrophication. Backgrounds and general issues*. RIVM report 550015002. Bilthoven, Holanda.
28. RINTELEN FRANSITORRA, Y. (noviembre de 2013). upcommons.upc.edu. [en línea]. Recuperado de: <<https://upcommons.upc.edu/browse?value=Rintelen%20Fransitorra,%20Yannick&type=author>>. [Consulta: 18 de julio de 2016].
29. United Nations Environment Programme. (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products*. USA: ONU.
30. Universidad de Pamplona. (s.f.). *Índices de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia municipal* (Vol. Capítulo III). Colombia.
31. VEGA RODRÍGUEZ, J. (noviembre de 2010). *Análisis de ciclo de vida de sistemas de tratamiento de aguas residuales: influencia de los materiales utilizados*. 96. Barcelona, España.
32. ZAMBRANO, D., VILLARREAL, C., GALVIS, A., & SILVA, J. (marzo de 2009). *Análisis de ciclo de vida en sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Virtual pro, 1-10.



# ANEXOS

## Anexo 1. Análisis del ciclo de vida social

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	<b>Trabajadores</b>					
<b>1,1</b>	<b>Horas de trabajo</b>					
a	¿Cuál es su horario de trabajo?					
b	¿La planta funciona las 24 horas o se desvía el caudal en algún momento (noche)?					
c	¿Trabajan horas extras?					
d	¿En emergencias por el clima o algún otro motivo, trabajan horas extras, fines de semana, vacaciones?					
e	¿Existe personal que puede cubrir enfermedades, emergencias, vacaciones, etc.?					
f	¿Existe personal para trabajos de mantenimiento?					
<b>1,2</b>	<b>Salud y Seguridad</b>					
a	¿Ha sufrido algún accidente en la planta?					
b	¿Se ha enfermado por trabajar en la planta?					
c	¿Mencione algunos riesgos de trabajar en la planta?					
d	¿Cuentan con visitas médicas programadas?					
e	¿Cuentan con botiquín en la PTAR?					
f	¿Cuentan con radio, teléfono, por alguna emergencia?					
<b>1,3</b>	<b>Libertad de asociación colectiva y beneficios sociales</b>					
a	¿Cuándo hacen horas extras se les paga o se les repone con tiempo?					
b	¿Les pagan de mejor forma los días feriados?					
c	¿Cuentan con algún tipo de seguro?					
d	¿Se tiene algún beneficio médico y dental?					
e	¿Cuentan con Seguro Social (IGSS)?					
f	¿Tienen libertad de asociación colectiva (Sindicato, Cooperativas, etc.)?					
<b>1,4</b>	<b>Salario Justo</b>					
a	¿El salario que recibe es adecuado respecto a su nivel educativo?					
b	¿El nivel de mecanización de la PTAR está relacionado con la preparación educativa?					
c	¿Qué nivel educativo es el mínimo requerido?					

Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>1</b>	<b>Trabajadores</b>					
<b>1,5</b>	<b>Disponibilidad de documentación de la PTAR</b>					
a	¿Existen planos en la PTAR?					
b	¿Existen estudios técnicos en la PTAR?					
c	¿Existe la memoria técnica, de cálculo de la PTAR?					
d	¿Existen Manuales de Operación y Mantenimiento?					
e	¿Existen planes de emergencia?					
f	¿Existen planes de formación para el personal?					
g	¿Existen documentos sobre la cantidad y calidad del agua de la PTAR?					
<b>1,6</b>	<b>Capacitación</b>					
a	¿Cuántas veces se han capacitado?					
b	¿Existe un plan de capacitación?					
c	¿Quién los capacita?					
d	¿Cómo es la capacitación?					
e	¿En dónde los capacitan?					
f	¿Tienen un programa de estudio?					
g	¿Cuánto tiempo dura la capacitación?					
<b>1,7</b>	<b>Programa de Monitoreo</b>					
a	¿Existe un control de la calidad del agua en la planta?					
b	¿Si existe cómo es el programa de monitoreo?					
c	¿Llega el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud a verificar la calidad del agua de la planta?					
d	¿Cada cuánto llegan estas instituciones responsables?					
e	¿Existe un presupuesto adecuado para la administración, operación y mantenimiento de la PTAR?					
<b>1,8</b>	<b>Materiales y Equipo</b>					
a	¿Cuentan con equipo de seguridad para trabajar?					
b	¿Cuentan con herramienta adecuada para trabajar en una PTAR?					
c	¿Tienen materiales de construcción para hacer alguna reparación?					
d	¿Tienen equipo para medir caudales?					
e	¿Cuentan con equipo para determinar la calidad del agua?					

Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
2	<b>Usuarios</b>					
<b>2,1</b>	<b>Seguridad y condiciones de vida saludable</b>					
a	¿Usted sabe qué pasa con el agua después de usarla en la universidad?					
b	¿Sabe que existe una planta de tratamiento para tratar las aguas residuales?					
c	¿Conoce dónde queda la PTAR dentro de la ciudad universitaria?					
d	¿Sabe como sale el agua de esa planta de tratamiento?					
e	¿Ha tenido quejas por la planta de tratamiento?					
f	¿Qué problemas se han presentado en la planta de tratamiento?					
<b>2,2</b>	<b>Compromiso de la comunidad universitaria y USAC</b>					
a	¿En la ciudad universitaria - PTAR cuál cree usted que es el mayor problema actualmente?					
b	¿En el futuro cuál cree usted que será uno de los mayores problemas si no se hace nada para detenerlo?					
c	¿Conoce la problemática de no tratar las aguas residuales?					
d	Considera que hay un compromiso de la universidad por tratar las aguas residuales?					
<b>2,3</b>	<b>Aceptación social</b>					
a	¿Está consciente que al usar el agua la estamos contaminando?					
b	¿Y qué la Universidad debe pagar, para mejorar la calidad de esas aguas residuales?					
<b>2,4</b>	<b>Empleo local</b>					
a	¿Los trabajadores de la PTAR viven en la comunidad, o en un sector cercano?					
b	¿Dónde viven los trabajadores de la PTAR?					
<b>2,5</b>	<b>Compromiso público con temas de sustentabilidad</b>					
a	¿Conoce la planta de tratamiento de aguas residuales de su Universidad?					
b	¿Cree que es justo el pago por mantenimiento y operación de la PTAR?					

Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>3</b>	<b>Consumidores</b>					
<b>3,1</b>	<b>Satisfacción del consumidor</b>					
1	¿Existieron quejas respecto a la planta de tratamiento?					
2	¿Fueron atendidas sus quejas o dudas respecto al sistema de tratamiento existente?					
3	¿Recibió un buen trato y se le atendió adecuadamente?					
<b>3,2</b>	<b>Mecanismo de retroalimentación</b>					
1	¿Existe alguna organización de la colonia que se preocupe por la PTAR.?					
2	¿Los vecinos solicitan información sobre la administración, operación y mantenimiento de la PTAR?					
3	¿El Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud, llegan frecuentemente a tomar muestras a la PTAR?					
<b>3,3</b>	<b>Calidad del efluente</b>					
1	¿Se cumple con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006?					
2	¿Se reutiliza el agua tratada?					
3	¿Se manejan los lodos?					
4	¿Se lleva un control de la reutilización del agua residual, para evitar la contaminación?					
		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>4</b>	<b>Proveedores</b>					
<b>4,1</b>	<b>Competencia Justa</b>					
1	¿Cómo se elige a los proveedores?					
2	¿Existe algún concurso de acuerdo a la ley vigente?					
3	¿Se le da prioridad a las empresas nacionales?					
4	¿Existen proveedores para la instalación informática, laboratorio, electromecánica, herramientas, etc.?					
<b>4,2</b>	<b>Relaciones con los proveedores</b>					
1	¿Cómo es su relación con la empresa?					
2	¿Le pagan en el tiempo estipulado?					
3	¿Le piden dinero por hacer un negocio o que se pueda realizar sus pagos?					
4	¿Las reglas son claras y no cambian drásticamente con el tiempo?					
<b>4,3</b>	<b>Promoción de la responsabilidad social</b>					
1	¿Cuentan con programas de responsabilidad social en su empresa?					
2	¿Cómo son esos programas de responsabilidad social?					
3	¿Han tenido éxito estos programas de responsabilidad social?					

Continuación de anexo 1.

(Ponderación de indicadores)

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	<b>Trabajadores</b>					
<b>1,1</b>	<b>Horas de trabajo</b>					
a	¿Cuál es su horario de trabajo?					
b	¿La planta funciona las 24 horas o se desvía el caudal en algún momento (noche)?					
c	¿Trabajan horas extras?					
d	¿En emergencias por el clima o algún otro motivo, trabajan horas extras, fines de semana, vacaciones?					
e	¿Existe personal que puede cubrir enfermedades, emergencias, vacaciones, etc.?					
f	¿Existe personal para trabajos de mantenimiento?					
<b>Conclusión</b>						<b>Excelente</b>
<b>1,2</b>	<b>Salud y Seguridad</b>					
a	¿Ha sufrido algún accidente en la planta?					
b	¿Se ha enfermado por trabajar en la planta?					
c	¿Mencione algunos riesgos de trabajar en la planta?					
d	¿Cuentan con visitas médicas programadas?					
e	¿Cuentan con botiquín en la PTAR?					
f	¿Cuentan con radio, teléfono, por alguna emergencia?					
<b>Conclusión</b>						<b>Aceptable</b>
<b>1,3</b>	<b>Libertad de asociación colectiva y beneficios sociales</b>					
a	¿Cuándo hacen horas extras se les paga o se les repone con tiempo?					
b	¿Les pagan de mejor forma los días feriados?					
c	¿Cuentan con algún tipo de seguro?					
d	¿Se tiene algún beneficio médico y dental?					
e	¿Cuentan con Seguro Social (IGSS)?					
f	¿Tienen libertad de asociación colectiva (Sindicato, Cooperativas, etc.)?					
<b>Conclusión</b>						<b>Aceptable</b>
<b>1,4</b>	<b>Salario Justo</b>					
a	¿El salario que recibe es adecuado respecto a su nivel educativo?					
b	¿El nivel de mecanización de la PTAR está relacionado con la preparación educativa?					
c	¿Qué nivel educativo es el mínima requerido?					
<b>Conclusión</b>						<b>Aceptable</b>

Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>1</b>	<b>Trabajadores</b>					
<b>1,5</b>	<b>Disponibilidad de documentación de la PTAR</b>					
a	¿Existen planos en la PTAR?					
b	¿Existen estudios técnicos en la PTAR?					
c	¿Existe la memoria técnica, de cálculo de la PTAR?					
d	¿Existen Manuales de Operación y Mantenimiento?					
e	¿Existen planes de emergencia?					
f	¿Existen planes de formación para el personal?					
g	¿Existen documentos sobre la cantidad y calidad del agua de la PTAR?					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				
<b>1,6</b>	<b>Capacitación</b> Fuente: elaboración propia, con datos modificados de la UNEP.					
a	¿Cuántas veces se han capacitado?					
b	¿Existe un plan de capacitación?					
c	¿Quién los capacita?					
d	¿Cómo es la capacitación?					
e	¿En donde los capacitan?					
f	¿Tienen un programa de estudio?					
g	¿Cuánto tiempo dura la capacitación?					
<b>Conclusión</b>		<b>Muy Pobre</b>				
<b>1,7</b>	<b>Programa de Monitoreo</b>					
a	¿Existe un control de la calidad del agua en la planta?					
b	¿Si existe cómo es el programa de monitoreo?					
c	¿Llega el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud a verificar la calidad del agua de la planta?					
d	¿Cada cuánto llegan estas instituciones responsables?					
e	¿Existe un presupuesto adecuado para la administración, operación y mantenimiento de la PTAR?					
<b>Conclusión</b>		<b>Bajo</b>				
<b>1,8</b>	<b>Materiales y Equipo</b>					
a	¿Cuentan con equipo de seguridad para trabajar?					
b	¿Cuentan con herramienta adecuada para trabajar en una PTAR?					
c	¿Tienen materiales de construcción para hacer alguna reparación?					
d	¿Tienen equipo para medir caudales?					
e	¿Cuentan con equipo para determinar la calidad del agua?					
<b>Conclusión</b>		<b>Bajo</b>				



Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
2	<b>Usuarios</b>					
<b>2,1</b>	<b>Seguridad y condiciones de vida saludable</b>					
a	¿Usted sabe qué pasa con el agua después de usarla en la universidad?					
b	¿Sabe que existe una planta de tratamiento para tratar las aguas residuales?					
c	¿Conoce dónde queda la PTAR dentro de la ciudad universitaria?					
d	¿Sabe como sale el agua de esa planta de tratamiento?					
e	¿Ha tenido quejas por la planta de tratamiento?					
f	¿Qué problemas se han presentado en la planta de tratamiento?					
<b>Conclusión</b>						<b>Excelente</b>
<b>2,2</b>	<b>Compromiso de la comunidad universitaria y USAC</b>					
a	¿En la ciudad universitaria - PTAR cuál cree usted que es el mayor problema actualmente?					
b	¿En el futuro cuál cree usted que será uno de los mayores problemas si no se hace nada para detenerlo?					
c	¿Conoce la problemática de no tratar las aguas residuales?					
d	Considera que hay un compromiso de la universidad por tratar las aguas residuales?					
<b>Conclusión</b>						<b>Aceptable</b>
<b>2,3</b>	<b>Aceptación social</b>					
a	¿Está consciente que al usar el agua la estamos contaminando?					
b	¿Y qué la Universidad debe pagar, para mejorar la calidad de esas aguas residuales?					
<b>Conclusión</b>						<b>Excelente</b>
<b>2,4</b>	<b>Empleo local</b>					
a	¿Los trabajadores de la PTAR viven en la comunidad, o en un sector cercano?					
b	¿Dónde viven los trabajadores de la PTAR?					
<b>Conclusión</b>						<b>Aceptable</b>
<b>2,5</b>	<b>Compromiso público con temas de sustentabilidad</b>					
a	¿Conoce la planta de tratamiento de aguas residuales de su Universidad?					
b	¿Cree que es justo el pago por mantenimiento y operación de la PTAR?					
<b>Conclusión</b>						<b>Excelente</b>

Continuación de anexo 1.

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
3	<b>Consumidores</b>					
<b>3,1</b>	<b>Satisfacción del consumidor</b>					
1	¿Existieron quejas respecto a la planta de tratamiento?					
2	¿Fueron atendidas sus quejas o dudas respecto al sistema de tratamiento existente?					
3	¿Recibió un buen trato y se le atendió adecuadamente?					
<b>Conclusión</b>		<b>No hay datos</b>				
<b>3,2</b>	<b>Mecanismo de retroalimentación</b>					
1	¿Existe alguna organización de la colonia que se preocupe por la PTAR?					
2	¿Los vecinos solicitan información sobre la administración, operación y mantenimiento de la PTAR?					
3	¿El Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud, llegan frecuentemente a tomar muestras a la PTAR?					
<b>Conclusión</b>		<b>No hay datos</b>				
<b>3,3</b>	<b>Calidad del efluente</b>					
1	¿Se cumple con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006?					
2	¿Se reutiliza el agua tratada?					
3	¿Se manejan los lodos?					
4	¿Se lleva un control de la reutilización del agua residual, para evitar la contaminación?					
<b>Conclusión</b>		<b>No hay datos</b>				
4	<b>Proveedores</b>					
<b>4,1</b>	<b>Competencia Justa</b>					
1	¿Cómo se elige a los proveedores?					
2	¿Existe algún concurso de acuerdo a la ley vigente?					
3	¿Se le da prioridad a las empresas nacionales?					
4	¿Existen proveedores para la instalación informática, laboratorio, electromecánica, herramientas, etc.?					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				
<b>4,2</b>	<b>Relaciones con los proveedores</b>					
1	¿Cómo es su relación con la empresa?					
2	¿Le pagan en el tiempo estipulado?					
3	¿Le piden dinero por hacer un negocio o que se pueda realizar sus pagos?					
4	¿Las reglas son claras y no cambian drásticamente con el tiempo?					
<b>Conclusión</b>		<b>Excelente</b>				
<b>4,3</b>	<b>Promoción de la responsabilidad social</b>					
1	¿Cuentan con programas de responsabilidad social en su empresa?					
2	¿Cómo son esos programas de responsabilidad social?					
3	¿Han tenido éxito estos programas de responsabilidad social?					
<b>Conclusión</b>		<b>No hay datos</b>				

Continuación de anexo 1.

(Ponderación de categorías)

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
<b>1</b>	<b>Trabajadores</b>					
1,1	Horas de trabajo					
1,2	Salud y Seguridad					
1,3	Libertad de asociación colectiva y beneficios sociales					
1,4	Salario Justo					
1,5	Disponibilidad de documentación de la PTAR					
1,6	Capacitación					
1,7	Programa de Monitoreo					
1,8	Materiales y Equipo					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				
<b>2</b>	<b>Usuarios</b>					
2,1	Seguridad y condiciones de vida saludable					
2,2	Compromiso de la comunidad universitaria y USAC					
2,3	Aceptación social					
2,4	Empleo local					
2,5	Compromiso público con temas de sustentabilidad					
<b>Conclusión</b>		<b>Excelente</b>				
<b>3</b>	<b>Consumidores</b>					
3,1	Satisfacción del consumidor					
3,2	Mecanismo de retroalimentación					
3,3	Calidad del efluente					
<b>Conclusión</b>		<b>No hay datos</b>				
<b>4</b>	<b>Proveedores</b>					
4,1	Competencia Justa					
4,2	Relaciones con los proveedores					
4,3	Promoción de la responsabilidad social					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				

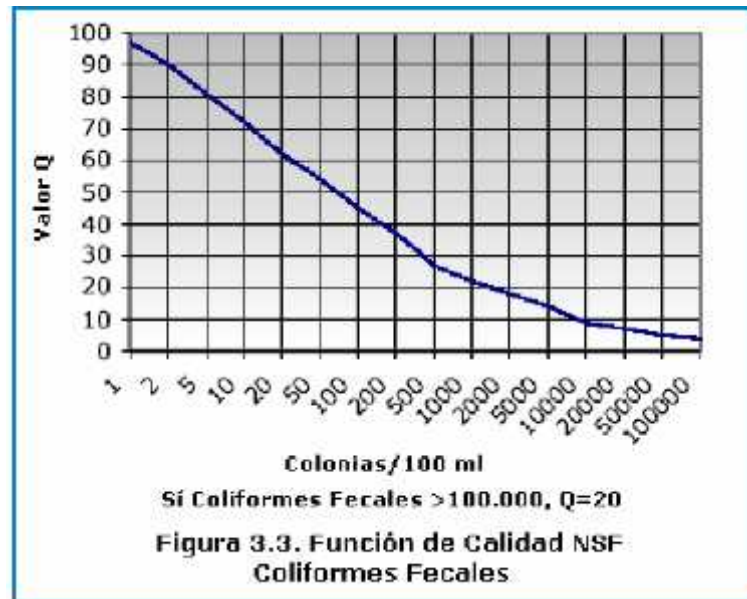
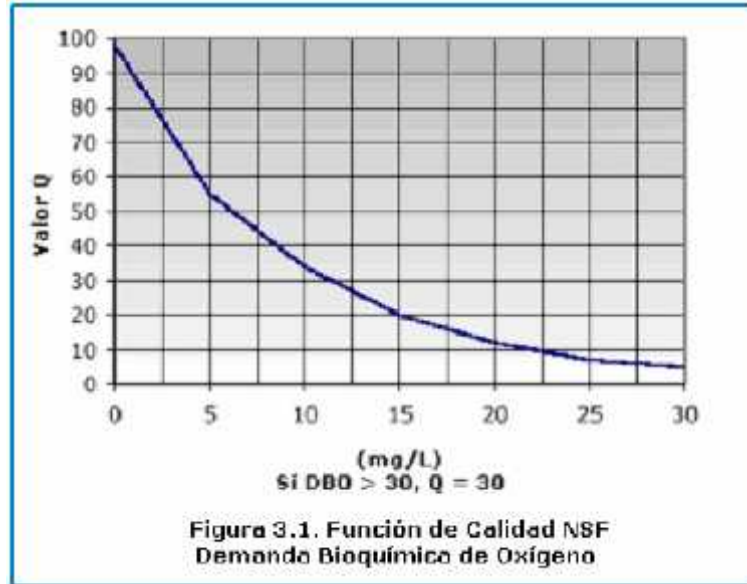
Continuación de anexo 1.

(Ponderación final)

		0	1	2	3	4
		No hay datos	Muy pobre	Bajo	Aceptable	Excelente
1	Trabajadores					
2	Usuarios					
3	Consumidores					
4	Proveedores					
<b>Conclusión</b>		<b>Aceptable</b>				

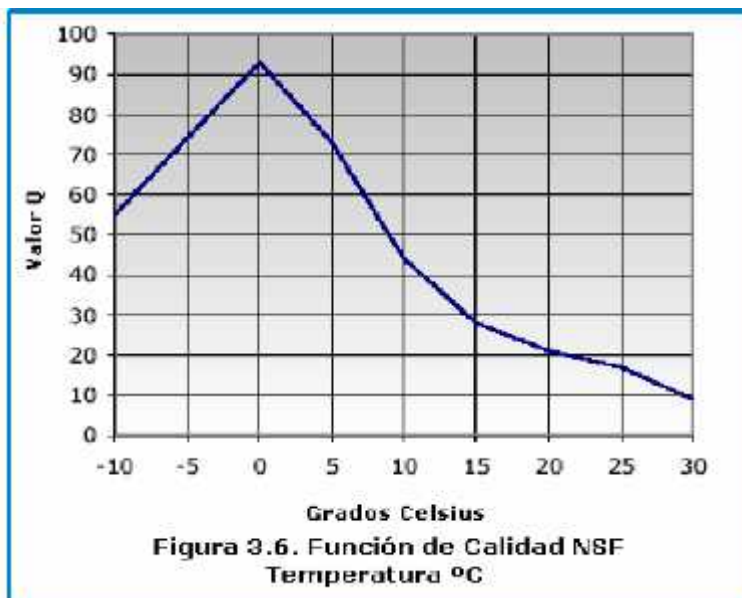
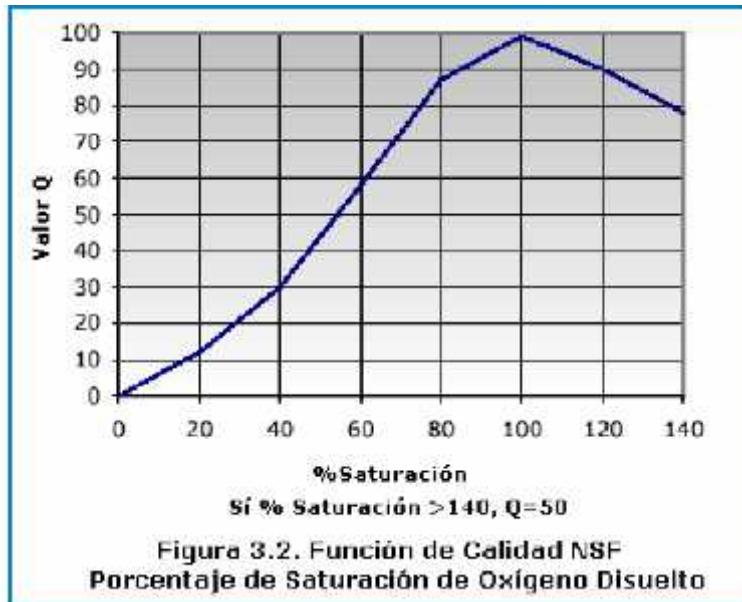
Fuente: elaboración propia, con información modificada de UNEP (2009).

Anexo 2. **Gráficas de índice de calidad del agua**



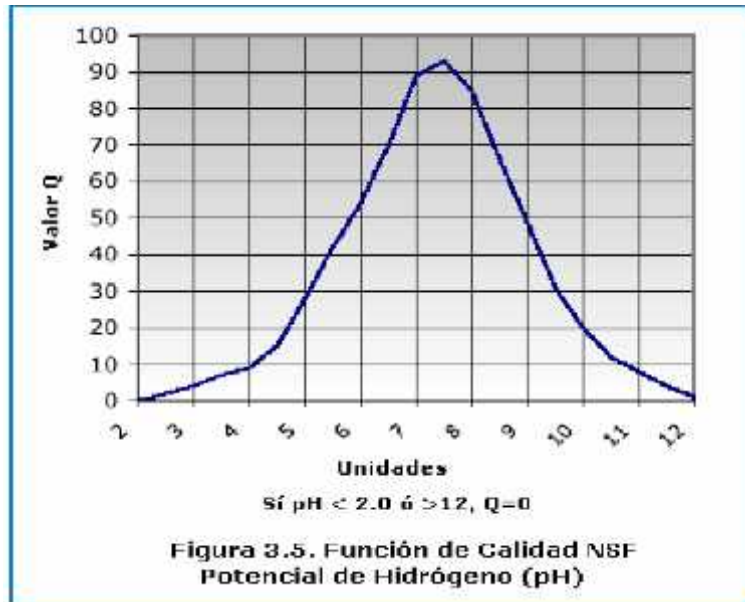
Fuente: Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos, NSF. *Índice de calidad del agua, WQI.*

Continuación de anexo 2.

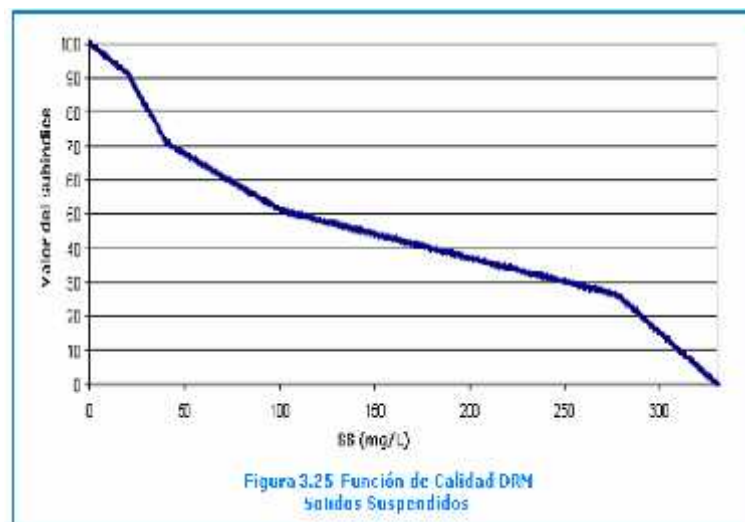


Fuente: Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos, NSF. *Índice de calidad del agua, WQI.*

Continuación de anexo 2.



Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos, NSF. *Índice de calidad del agua, WQI.*



Fuente: Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos, NSF. *Índice de calidad del agua para el Río Des Moines, DRM WQI.*

### Anexo 3. Características del agua residual que ingresa, afluente, a la PTAR de la USAC

La recolección de las muestras del agua residual que ingresa a la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, fue realizada al final del tubo del drenaje y previo al pretratamiento.

#### Características del agua residual que ingresa a la PTAR de la USAC

Características del afluente										
Núm.	Fecha de recolección	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Temp. (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Fosfatos (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)
1	06/10/2016	383,00	211,50	187,50	7,90	23,60	0,51	8,00	21,50	8065325,30
2	13/10/2016	255,00	113,99	115,25	8,82	29,30	0,63	22,00	22,50	4160000,00
3	18/10/2016	434,00	171,50	225,81	7,77	21,50	1,15	22,50	21,00	10462000,00
4	27/10/2016	513,00	171,00	276,00	8,48	24,00	0,73	7,50	32,50	24196000,00
5	22/02/2017	471,00	210,50	300,00	6,19	22,90	1,73	9,60	31,50	8065325,30
6	23/02/2017	492,00	212,00	277,14	7,74	22,80	1,18	8,50	28,00	10462000,00
7	01/03/2017	490,00	190,00	188,00	7,98	23,00	1,35	8,50	37,50	24196000,00
8	02/03/2017	326,00	129,00	120,51	8,18	22,70	1,49	2,00	15,00	24196000,00
9	09/03/2017	986,00	148,00	524,00	8,20	22,90	0,65	0,50	150,00	24196000,00
<b>Mínimo</b>		255,00	113,99	115,25	6,19	21,50	0,51	0,50	15,00	4160000,00
<b>Máximo</b>		986,00	212,00	524,00	8,82	29,30	1,73	22,50	150,00	24196000,00
<b>Promedio - media</b>		483,33	173,05	246,02	7,92	23,63	1,05	9,90	39,94	15333183,39
<b>Mediana</b>		471,00	171,50	225,81	7,98	22,90	1,15	8,50	28,00	10462000,00
<b>Desviación estándar</b>		207,13	36,65	123,54	0,73	2,23	0,43	7,66	41,85	8603331,32

Fuente: elaboración propia.

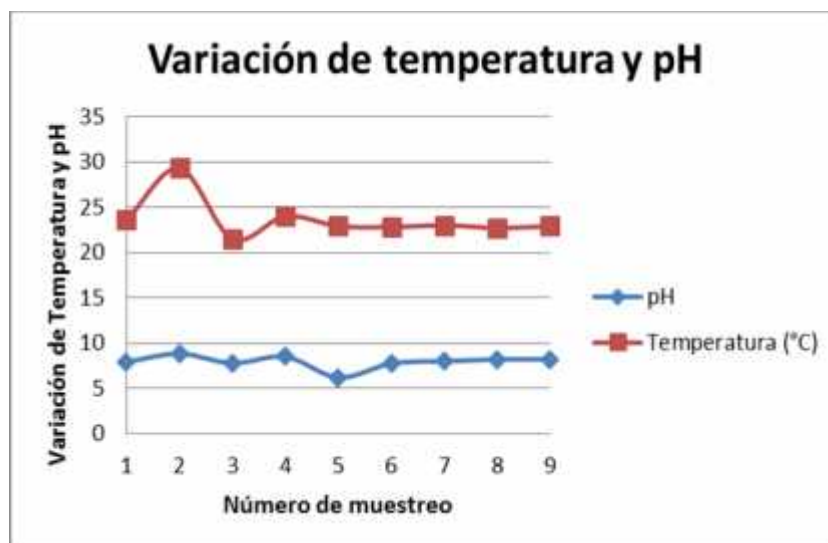


Anexo 3a. **Gráficas de datos obtenidos en el afluente de la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de anexo 3a.



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de anexo 3a.



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

#### Anexo 4. Características del agua tratada, efluente, d la PTAR de la USAC

La siguiente tabla muestra las características del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC.

#### Características del agua tratada, efluente, de la PTAR de la USAC

Características del efluente										
No.	Fecha de recolección	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Potencial de Hidrógeno (pH)	Temperatura (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Fosfatos (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 ml)
1	06/10/2016	9,00	2,82	0,30	4,48	28	5,66	98,5	23	241990
2	13/10/2016	6,00	1,65	2,42	5,65	26,9	6,87	86,5	25,5	520
3	18/10/2016	23,00	6,20	13,18	5,62	19,7	6,63	148	42	7710
4	27/10/2016	25,00	4,36	5,51	5,75	23,3	6,61	107,5	25	241960
5	22/02/2017	56,00	8,10	7,40	4,17	19,2	6,45	33,5	33	111990
6	23/02/2017	37,00	7,30	6,98	6,76	18,9	4,46	41,5	21,5	18600
7	01/03/2017	34,00	3,85	2,67	6,35	19,8	6,23	44,5	24,5	23590
8	02/03/2017	19,00	6,44	7,83	6,6	18,8	5,78	99,5	24,5	141360
9	09/03/2017	35,00	3,90	9,00	6,33	19,1	6,39	62,5	170	72700
<b>Mínimo</b>		6,00	1,65	0,30	4,17	18,80	4,46	33,50	21,50	520,00
<b>Máximo</b>		56,00	8,10	13,18	6,76	28,00	6,87	148,00	170,00	241990,00
<b>Promedio - Media</b>		27,11	4,96	6,14	5,75	21,52	6,12	80,22	43,22	95602,22
<b>Mediana</b>		25,00	4,36	6,98	5,75	19,70	6,39	86,50	25,00	72700,00
<b>Desviación estándar</b>		15,42	2,16	3,93	0,91	3,64	0,74	37,68	47,97	95928,10

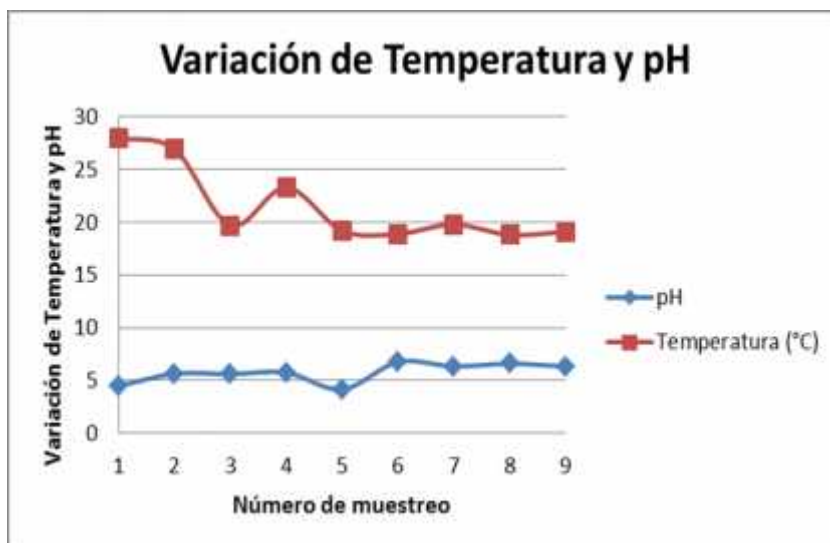
Fuente: elaboración propia.

Anexo 4a. **Gráficas de datos obtenidos en el efluente de la PTAR de la USAC**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de anexo 4a.



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de anexo 4a.



Fuente: elaboración propia, empleando Excel

Anexo 5. **Planos de la PTAR de la USAC**

Plano 1: Planta de ubicación.

Plano 2: Perfil hidráulico.

Plano 3: Patio de secado de lodos, desarenador y detalles.

Plano 4: Filtros percoladores.