

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

**"EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO TERCIARIO ACTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR PARA DETERMINAR LA REMOCIÓN DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE EN LA DESCARGA HACIA EL RÍO CONTRERAS"**

TESIS DE GRADO

**LUIS ANTONIO GARCÍA GUTIERREZ**  
CARNET 10031-12

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, SEPTIEMBRE DE 2017  
CAMPUS CENTRAL

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

**"EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO TERCIARIO ACTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR PARA DETERMINAR LA REMOCIÓN DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE EN LA DESCARGA HACIA EL RÍO CONTRERAS"**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA

POR  
**LUIS ANTONIO GARCÍA GUTIERREZ**

PREVIO A CONFERÍRSELE  
EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, SEPTIEMBRE DE 2017  
CAMPUS CENTRAL

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

DECANA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA DE ZUNIGA

SECRETARIA: MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN

DIRECTOR DE CARRERA: DR. MARIO RENE SANTIZO CALDERON

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

MGTR. ANNA MARGARITA RIOS GONZALEZ

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. JOSE ANTONIO ROSAL CHICAS

MGTR. JOSÉ MANUEL CASTAÑEDA ORELLANA

ING. JUAN CARLOS GARCÍA CERÓN



### Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante LUIS ANTONIO GARCÍA GUTIERREZ, Carnet 10031-12 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02508-2017 de fecha 24 de agosto de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**"EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO TERCIARIO ACTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR PARA DETERMINAR LA REMOCIÓN DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE EN LA DESCARGA HACIA EL RÍO CONTRERAS"**

Previo a conferírsele el título de INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, al día 1 del mes de septiembre del año 2017.



MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN, SECRETARIA  
INGENIERÍA  
Universidad Rafael Landívar



Universidad  
Rafael Landívar  
Tradición Jesuita en Guatemala

**Facultad de Ingeniería**  
Teléfono: (502) 24262626  
: (502) 24262628  
Campus Central, Vista Hermosa III, Zona 16  
Guatemala, Ciudad. 01016

Guatemala, 6 de Julio del 2017

Mgr. Alejandra Ortíz  
Secretaria de Facultad  
Facultad de Ingeniería

Por este medio me dirijo a usted deseándole todas sus actividades se estén llevando con total éxito.

El motivo de la presente es para informarle que he visto y revisado el informe final de tesis titulado: "EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO TERCIARIO ACTUAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR PARA DETERMINAR LA REMOCIÓN DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE EN LA DESCARGA HACIA EL RIO CONTRERAS", del estudiante LUIS ANTONIO GARCIA GUTIERREZ quien se identifica con No. De Carnet 10031-12.

Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy como aprobado dicho trabajo de tesis previo a optar el título de INGENIERO QUIMICO INDUSTRIAL en el grado académico de Licenciado.

Sin otro particular, me suscribo de Ud.  
Atentamente

Mgr. Anna Margarita Ríos González  
Asesor de Tesis

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MIS PADRES**

Por todo el esfuerzo que han hecho a lo largo de mi vida para que yo sea la persona que soy hoy. Por su apoyo y el cariño incondicional que en todo momento nos han demostrado a mí y a mi hermana. Muchas gracias por ser quienes son.

### **A MI HERMANA**

Por tu cariño y el apoyo que siempre me has demostrado. Porque juntos venimos a este mundo y siempre has estado conmigo en cada una de las etapas de mi vida.

### **A MIS AMIGOS**

Por brindarme su apoyo incondicional en todo momento. Aprecio mucho la amistad de cada uno de ustedes.

### **A MI ASESORA**

Por compartir conmigo sus conocimientos. Por su motivación y el total apoyo que me brindó en todo momento para la realización de esta investigación.

### **A MIS CATEDRÁTICOS**

Por todos y cada uno de los conocimientos que me transmitieron durante mi paso por la universidad, los cuales han contribuido a mi formación profesional.

### **AL VOLUNTARIADO SOCIAL LANDIVARIANO**

Por motivarme a trabajar por un país mucho más justo e incluyente a través del servicio a los demás. Por hacerme ver que cualquier acción puede cambiar el mundo de alguien para bien, por más pequeña que ésta sea.

### **A LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

Por brindarme una excelente educación integral en el área profesional y humana. Por demostrarme que todos debemos trabajar por una mejor Guatemala desde cualquiera que sea nuestra profesión.

DEDICADO A  
**KELLY, MARTITA Y MARCO ANTONIO**

Porque ustedes tres han sido mi guía y fortaleza para emprender cualquier reto que me he propuesto. Por todo su sacrificio y esfuerzo para que yo sea la persona que soy hoy. Porque los amo y sus vidas tienen un significado muy grande en la mía. Porque son lo más importante que tengo y porque los momentos más felices de mi existencia han sido al lado de ustedes.

**PORQUE SON UNA FAMILIA MARAVILLOSA Y  
SON EL MEJOR REGALO QUE PUDO DARME LA VIDA**

*“¿Y si tuviéramos reuniones en las noches?  
Si pudiéramos plantar una tienda en alguna parte  
podríamos tener reuniones aunque lloviese o hiciese sol.”*

**-La gente más feliz de la Tierra.**

## ÍNDICE GENERAL

### CAPÍTULO I

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
1.1. Lo escrito sobre el tema.....	4
1.2. Resumen crítico del marco teórico .....	6
1.2.1. Aguas residuales .....	6
1.2.2. Contaminación biológica de las aguas negras.....	8
1.2.3. Calidad del agua .....	9
1.2.4. Demanda bioquímica de oxígeno .....	10
1.2.5. Demanda química de oxígeno .....	11
1.2.6. Sólidos totales disueltos .....	12
1.2.7. Grupo coliforme .....	12
1.2.8. Importancia del tratamiento de las aguas negras .....	13
1.2.9. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....	14
1.2.10. Tratamiento preliminar .....	15
1.2.11. Tratamiento primario.....	15
1.2.12. Tratamiento secundario .....	16
1.2.13. Tratamiento terciario .....	16
1.2.14. Tratamiento de lodos .....	17
1.2.15. PTAR del Campus Central de la URL.....	17
1.2.16. Desinfección como tratamiento terciario .....	21
1.2.17. Cloración del agua .....	23
1.2.18. Factores que afectan la eficiencia de desinfección del cloro .....	26
1.2.19. Cloro libre y combinado .....	26
1.2.20. Curva de demanda de cloro.....	31
1.2.21. Otros métodos de desinfección en tratamiento de agua.....	34
1.2.22. Marco legal del tratamiento de aguas residuales en Guatemala ....	36

### CAPÍTULO II

<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	38
2.1. Objetivos.....	40
2.1.1. Objetivo general.....	40
2.1.2. Objetivos específicos .....	40
2.2. Hipótesis .....	41

2.3. Elementos de estudio .....	41
2.4. Definición de los elementos de estudio .....	41
2.5. Alcances y límites .....	43
2.6. Aporte .....	44

### **CAPÍTULO III**

<b>MÉTODO</b> .....	45
3.1. Sujetos y unidades de análisis.....	45
3.1.1. Sujetos.....	45
3.1.2. Unidades de análisis.....	46
3.2. Instrumentos .....	47
3.2.1. Instrumentos y equipos de medición.....	47
3.2.2. Equipo de captación de muestras.....	49
3.2.3. Equipo de protección personal .....	50
3.3. Procedimiento.....	51
3.3.1. Observación preliminar de la situación .....	51
3.3.2. Búsqueda de información para fijar bases del estudio.....	51
3.3.3. Determinación del volumen de la cubeta a utilizar .....	51
3.3.4. Realización del muestreo .....	52
3.3.5. Determinación de dosificación de cloro libre en el clorador .....	58
3.4. Diseño y metodología estadística .....	61
3.4.1. Localización .....	61
3.4.2. Número de muestras .....	62
3.4.3. Puntos de muestreo.....	64
3.4.4. Frecuencia de toma de muestras.....	65
3.4.5. Descripción de las unidades experimentales.....	66
3.4.6. Metodología de análisis .....	67

### **CAPÍTULO IV**

<b>PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	69
4.1. Situación actual del tratamiento terciario .....	69
4.1.1. Infraestructura.....	69
4.1.2. Clorador .....	71
4.1.3. Desinfectante.....	73
4.1.4. Mantenimiento .....	74

4.2. Parámetros de control.....	75
4.2.1. DQO.....	75
4.2.2. DBO <sub>5</sub> .....	76
4.2.3. Coliformes fecales .....	77
4.2.4. pH .....	78
4.2.5. Temperatura .....	79
4.2.6. Sólidos totales disueltos .....	80
4.2.7. Caudal de agua tratada en tratamiento terciario .....	81
4.2.8. Concentración de cloro libre en solución generada en el clorador ...	82
4.3. Carga microbiológica contaminante removida en el tratamiento terciario... 83	
4.4. Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante del tratamiento terciario de la PTAR.....	84
4.5. Cumplimiento legal en la descarga hacia el río Contreras.....	85
4.6. Relación entre eficiencia de remoción de la carga microbiológica contaminante y parámetros de control.....	86
4.7. Propuesta de mejora a la eficiencia del tratamiento terciario actual .....	83
4.8. Resumen de los resultados obtenidos.....	94
 <b>CAPÍTULO V</b>	
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>95</b>
 <b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
 <b>CAPÍTULO VII</b>	
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>108</b>
 <b>CAPÍTULO VIII</b>	
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>109</b>
 <b>ANEXOS.....</b>	<b>113</b>
Anexo A: Glosario .....	113
Anexo B: Etiqueta para identificación de muestras .....	117
Anexo C: Resultados originales de laboratorio emitidos por LAFYM .....	118

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Efecto del pH en el tiempo de desinfección con residuales de cloro ...	30
<b>Gráfica 2.</b> Efecto de la temperatura en la concentración de residuales de cloro..	31
<b>Gráfica 3.</b> Curva de demanda de cloro.....	32
<b>Gráfica 4.</b> Determinación del número de muestras .....	63
<b>Gráfica 5.</b> Variación de la DQO durante el tratamiento terciario.....	75
<b>Gráfica 6.</b> Variación de la DBO <sub>5</sub> durante el tratamiento terciario.....	76
<b>Gráfica 7.</b> Variación de los coliformes fecales durante el tratamiento terciario.....	77
<b>Gráfica 8.</b> Variación del pH durante el tratamiento terciario .....	78
<b>Gráfica 9.</b> Variación de la temperatura durante el tratamiento terciario.....	79
<b>Gráfica 10.</b> Sólidos totales disueltos en CDR.....	80
<b>Gráfica 11.</b> Variación en el caudal de agua tratada en el tratamiento terciario ....	81
<b>Gráfica 12.</b> Concentración de cloro libre en la solución generada en clorador.....	82
<b>Gráfica 13.</b> Carga microbiológica contaminante removida .....	83
<b>Gráfica 14.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante.....	84
<b>Gráfica 15.</b> Cumplimiento legal respecto al Acuerdo Gubernativo 236-2006 .....	85
<b>Gráfica 16.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y DQO en CDR.....	86
<b>Gráfica 17.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y DBO <sub>5</sub> en CDR.....	86
<b>Gráfica 18.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y STD en CDR.....	87
<b>Gráfica 19.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y pH en CDR .....	87
<b>Gráfica 20.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y tempera en CDR..	88
<b>Gráfica 21.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica y caudal en CDR ....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Canal de excedencias de la PTAR de la URL .....	18
<b>Figura 2.</b> Sedimentador primario de la PTAR de la URL .....	19
<b>Figura 3.</b> Filtros percoladores de la PTAR de la URL.....	20
<b>Figura 4.</b> Clorador de la PTAR de la URL. ....	20
<b>Figura 5.</b> Unidades de tratamiento de la PTAR de la URL .....	21
<b>Figura 6.</b> Tasa de desinfección.....	22
<b>Figura 7.</b> Tiempo de desinfección.....	22
<b>Figura 8.</b> Tasa de desinfección con cloro .....	23
<b>Figura 9.</b> Tiempo de desinfección con cloro .....	23
<b>Figura 10.</b> Reacción entre cloro y agua.....	26
<b>Figura 11.</b> Disociación del ácido hipocloroso.....	26
<b>Figura 12.</b> Disociación del hipoclorito de sodio.....	27
<b>Figura 13.</b> Reacción del ion hipoclorito con agua .....	27
<b>Figura 14.</b> Reacción del ácido tricloroisocianúrico con agua.....	27
<b>Figura 15.</b> Formación de monocloramina .....	27
<b>Figura 16.</b> Formación de dicloramina .....	27
<b>Figura 17.</b> Formación de tricloramina .....	27
<b>Figura 18.</b> Medidor de cloro libre .....	47
<b>Figura 19.</b> Termómetro de queroseno .....	47
<b>Figura 20.</b> Cronómetro utilizado .....	47
<b>Figura 21.</b> Potenciómetro utilizado .....	48
<b>Figura 22.</b> Probeta utilizada.....	48
<b>Figura 23.</b> Equipo y material utilizado para la captación de muestras.....	49
<b>Figura 24.</b> Equipo de protección utilizado en la toma de muestras .....	50
<b>Figura 25.</b> Determinación del volumen de la cubeta utilizada .....	51
<b>Figura 26.</b> Preparación del equipo de protección personal .....	52
<b>Figura 27.</b> Preparación del equipo de captación de muestras.....	53
<b>Figura 28.</b> Uso del equipo de protección personal y de captación de muestras...	54
<b>Figura 29.</b> Muestras identificadas almacenadas en hielera.....	54
<b>Figura 30.</b> Determinación del caudal de descarga al río .....	55

<b>Figura 31.</b> Toma de muestra en SSS1 .....	56
<b>Figura 32.</b> Toma de muestra en CDR.....	56
<b>Figura 33.</b> Captación de muestra en SSS1 .....	57
<b>Figura 34.</b> Determinación de caudal y captación de muestra en CDR .....	57
<b>Figura 35.</b> Determinación de dosificación de cloro en el clorador .....	58
<b>Figura 36.</b> Toma de muestra de solución de cloro del interior del clorador .....	60
<b>Figura 37.</b> Adición de reactivo DPD a la muestra de solución de cloro .....	60
<b>Figura 38.</b> Obtención de concentración real de cloro libre en solución .....	60
<b>Figura 39.</b> Localización de la PTAR del Campus Central de URL.....	61
<b>Figura 40.</b> Número de muestras.....	62
<b>Figura 41.</b> Puntos de muestreo en la PTAR del Campus Central de la URL.....	64
<b>Figura 42.</b> Eficiencia de remoción de un contaminante .....	67
<b>Figura 43.</b> Carga microbiológica contaminante .....	67
<b>Figura 44.</b> Carga microbiológica contaminante removida.....	68
<b>Figura 45.</b> Caudal promedio .....	68
<b>Figura 46.</b> Parte frontal de la infraestructura del tratamiento terciario .....	70
<b>Figura 47.</b> Parte trasera de la infraestructura del tratamiento terciario .....	70
<b>Figura 48.</b> Interior de la caja de registro de adición de cloro .....	71
<b>Figura 49.</b> Clorador de la PTAR .....	72
<b>Figura 50.</b> Válvula de agua potable .....	72
<b>Figura 51.</b> Pastilla de <i>Duraclor</i> <sup>®</sup> .....	73
<b>Figura 52.</b> Etiqueta del bidón de <i>Duraclor</i> <sup>®</sup> .....	73
<b>Figura 53.</b> Sedimentador primario actual de la PTAR de la URL.....	89
<b>Figura 54.</b> Sedimentador de placas inclinadas.....	89
<b>Figura 55.</b> Sedimentador de placas múltiples.....	90
<b>Figura 56.</b> Efecto del aumento de concentración de agua en medio filtrante .....	91
<b>Figura 57.</b> Efecto de disminución de concentración de agua en medio filtrante ...	91
<b>Figura 58.</b> Tanque de contacto con deflectores de tipo serpentin .....	91
<b>Figura 59.</b> Difusor para canal abierto de tubería perforada .....	92
<b>Figura 60.</b> Etiqueta utilizada para la identificación de muestras.....	117

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estabilidad de soluciones de hipoclorito de sodio.....	24
<b>Tabla 2.</b> Efectividad desinfectante del cloro libre y combinado.....	28
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones mínimas de cloro residual para desinfección efectiva .	29
<b>Tabla 4.</b> Comparación de las fuentes de desinfectantes en tratamiento de agua.	34
<b>Tabla 5.</b> Comparación de efectividad bactericida entre desinfectantes .....	35
<b>Tabla 6.</b> Consideraciones de los desinfectantes usados en tratamiento de agua.	35
<b>Tabla 7.</b> Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores.....	37
<b>Tabla 8.</b> Instrumentos y equipos de medición utilizados en el estudio.....	47
<b>Tabla 9.</b> Instrumentos y equipos de medición utilizados en el estudio.....	48
<b>Tabla 10.</b> Equipo y material utilizado para la captación de muestras .....	49
<b>Tabla 11.</b> Equipo de protección utilizado en la toma de muestras .....	50
<b>Tabla 12.</b> Coordenadas geográficas de la PTAR del Campus Central .....	61
<b>Tabla 13.</b> Simbología utilizada en <i>Figura 41</i> .....	64
<b>Tabla 14.</b> Evaluación preliminar de la infraestructura del tratamiento terciario .....	69
<b>Tabla 15.</b> Infraestructura del tratamiento terciario.....	70
<b>Tabla 16.</b> Caja de adición de cloro.....	71
<b>Tabla 17.</b> Evaluación preliminar del clorador del tratamiento terciario.....	71
<b>Tabla 18.</b> Clorador del tratamiento terciario .....	72
<b>Tabla 19.</b> Evaluación preliminar del desinfectante del tratamiento terciario.....	73
<b>Tabla 20.</b> Desinfectante utilizado en el tratamiento terciario de la PTAR .....	73
<b>Tabla 21.</b> Evaluación preliminar del mantenimiento del tratamiento terciario .....	74
<b>Tabla 22.</b> DQO obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR .....	75
<b>Tabla 23.</b> DBO <sub>5</sub> obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR .....	76
<b>Tabla 24.</b> Concentración de coliformes fecales obtenida en SSS1 y CDR .....	77
<b>Tabla 25.</b> pH obtenido en el agua residual de SSS1 y CDR.....	78
<b>Tabla 26.</b> Temperatura obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR .....	79
<b>Tabla 27.</b> Concentración de STD obtenida en el agua residual de CDR .....	80
<b>Tabla 28.</b> Caudal de agua tratada en tratamiento terciario .....	81
<b>Tabla 29.</b> Concentración de cloro libre en solución generada en el clorador.....	82
<b>Tabla 30.</b> Carga microbiológica contaminante removida en tratamiento terciario.	83

<b>Tabla 31.</b> Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante .....	84
<b>Tabla 32.</b> Cumplimiento legal respecto al Acuerdo Gubernativo 236-2006 .....	85
<b>Tabla 33.</b> Resumen de los parámetros obtenidos en SSS1 .....	94
<b>Tabla 34.</b> Resumen de los parámetros obtenidos en CDR .....	94
<b>Tabla 35.</b> Resumen de los resultados obtenidos del tratamiento terciario .....	94

## ABREVIATURAS

<b>CDR</b>	Caja de descarga hacia el río Contreras.
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días.
<b>DPD</b>	N,N-dietil-p-fenilendiamina.
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno.
<b>L/s</b>	Litros por segundo.
<b>mL</b>	Mililitro.
<b>NMP</b>	Número más probable.
<b>ppm</b>	Partes por millón.
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales.
<b>STD</b>	Sólidos Totales Disueltos.
<b>SSS1</b>	Salida del Sedimentador Secundario 1.
<b>TCCA</b>	Ácido tricloroisocianúrico.
<b>THM</b>	Trihalometano.
<b>URL</b>	Universidad Rafael Landívar.
<b>UV</b>	Ultravioleta

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio evaluó el tratamiento terciario actual de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar para determinar la remoción de carga microbiológica contaminante en la descarga hacia el río Contreras dada la necesidad de establecer si la cloración efectuada en dicho tratamiento se llevaba a cabo de tal forma que la concentración de coliformes fecales presentes en el agua residual no excediera el límite máximo permisible de  $1 \times 10^5$  NMP/100 mL indicado en la etapa II del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 de la República de Guatemala.

Para ello se realizaron durante la estación seca cuatro muestreos del agua residual en dos puntos diferentes de la PTAR. Uno de ellos se ubicó en la salida del sedimentador secundario 1 –SSS1– para captar agua residual previo a su ingreso al tratamiento terciario, y el otro en la caja de descarga hacia el río –CDR–, ubicada después de la unidad de cloración, para obtener agua ya tratada previo a ser descargada hacia el río Contreras.

En cada muestreo se determinó la concentración de coliformes fecales y el caudal de agua tratada así como los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO, STD, pH y temperatura para posteriormente relacionarlo con la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante. También se evaluó el estado actual de la infraestructura, su mantenimiento, el clorador utilizado y la solución de cloro generada en el mismo, determinándose que la dosificación real que maneja el tratamiento terciario es de 15 ppm de cloro libre.

El estudio determinó, con un 90% de nivel de confianza, que el tratamiento terciario actual de la PTAR en estación seca bajo condiciones normales funciona con una eficiencia media de remoción de carga microbiológica contaminante del 36.99%, eliminando una carga media de  $7.0 \times 10^{11}$  NMP/día de coliformes fecales que representa una concentración media de coliformes fecales de  $6.51 \times 10^6$  NMP/100 mL en la descarga al río Contreras. Esto indica que la calidad microbiológica del agua residual tratada en el tratamiento terciario incumple con lo establecido en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, que rige actualmente las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores de Guatemala.

---

**Descriptores:** Planta de tratamiento de aguas residuales, tratamiento terciario, cloración, coliformes fecales.

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

Es indudable la importancia del agua en el sustento y desarrollo de la vida en la Tierra. Ésta supone un recurso imprescindible para todo ser vivo, lo cual deriva en una lucha constante por su cuidado y conservación. Para ello, se han planteado una gran variedad de estrategias que tratan de mitigar la contaminación de los recursos hídricos siendo las plantas de tratamiento de aguas residuales una alternativa bastante efectiva.

En el año 2008, las autoridades del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar fijaron como prioridad la instalación de un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en las instalaciones del Campus a fin de cubrir la demanda de estudiantes y cumplir las normativas ambientales del país, iniciándose su construcción un año más tarde y entrando en funcionamiento en el año 2011.

La PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar lleva a cabo su funcionamiento con tres tratamientos, de los cuales en el terciario se pretende mejorar la calidad microbiológica del agua residual mediante un tratamiento químico. Este estudio evaluó el estado actual de este tratamiento para determinar la carga microbiológica contaminante causada por coliformes fecales en la descarga hacia el río Contreras, utilizando como referencia las normativas fijadas en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

A partir de los resultados obtenidos, se pretende que las autoridades correspondientes de la Universidad Rafael Landívar puedan tomar acciones correctivas que permitan minimizar el impacto ambiental que la actividad humana del Campus Central provoca en la descarga de sus aguas residuales en la microcuenca del río Contreras evitando así la proliferación de enfermedades entre los habitantes de las urbanizaciones aledañas y contribuyendo con la preservación de la flora y fauna del ecosistema.

## **1.1. LO ESCRITO SOBRE EL TEMA**

Aguilar (2008) realizó un informe final en el cual detalla los lineamientos bajo los cuales se construiría la PTAR actual de la Universidad Rafael Landívar. Para ello inicialmente se determinó el origen de las aguas a tratar y se realizó una caracterización de las mismas, determinando así su calidad. Con ello, se lograron establecer los porcentajes de remoción de contaminantes para que el agua a tratar pudiera cumplir con el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Adicional a ello, en dicho informe final también se realiza una proyección del caudal que la PTAR espera tratar en un espacio de tiempo hasta el año 2039 tomando en cuenta el número de unidades sanitarias con las que se contaba al mismo tiempo en que se analizaban las principales características bajo las cuales se debía construir la planta, las cuales incluían las condiciones ambientales del Río Contreras, topografía del terreno y su accesibilidad.

Recinos y Barrios (2010) en su trabajo de graduación proponen una guía para el muestreo analítico cuantitativo en la PTAR de la Universidad Rafael Landívar, la cual es presentada como una planta-escuela. En el documento se brinda información general de los procesos de tratamiento y las unidades específicas con las que cuenta la planta, abordando también temas relacionados al muestreo tales como el procedimiento, instrumentación y medidas de seguridad necesaria para la toma de muestras en la PTAR.

Por otro lado, López (2014) en su investigación menciona entre algunos de sus propósitos realizar un análisis del agua residual proveniente de un complejo habitacional ubicado en Palín, Escuintla para establecer los requerimientos mínimos para su tratamiento adecuado. Se enlistan una serie a tomarse en cuenta para la instalación de una PTAR, y se presenta un estudio de pre factibilidad que permitió justificar la viabilidad del proyecto planteado, concluyéndose que las aguas residuales generadas en el área de estudio podrían ser tratadas adecuadamente con el propósito de cumplir con la normativa vigente en Guatemala.

Lemus y Recinos (2015) indican en su estudio especial *“Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar para el reúso en riego del agua tratada como tratamiento terciario para la remoción de nutrientes”* que el funcionamiento del sistema de tratamiento de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar es deficiente debido a algunos procesos erróneos en su mantenimiento, la infraestructura y al heterogéneo caudal que la planta recibe, significando el efluente generado un riesgo para la salud del ser humano.

Klein (2015), realizó una evaluación en donde se propuso establecer la eficiencia con la que opera la PTAR “La Cerra”, ubicada en el municipio de Villa Canales durante el período comprendido entre los años 2008 y 2013 mediante la determinación de ciertos parámetros fisicoquímicos como DBO, DQO y STD. Los resultados obtenidos fueron comparados con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, concluyéndose que la PTAR sí cumplía con la normativa, lo cual contribuye a mejorar la calidad del efluente del río Villalobos.

Finalmente, Lavagnino (2016) en su trabajo de graduación analiza la eficiencia en la remoción de contaminantes de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar en época seca y lluviosa, concluyendo que la cloración como tratamiento terciario actual que recibe el agua tratada, únicamente reduce la concentración de coliformes fecales y manifiesta la necesidad de implementar un sistema de remoción de nitrógeno y fósforo que complemente el tratamiento terciario con la finalidad de evitar la eutrofización del río Contreras.

## **1.2. RESUMEN CRÍTICO DEL MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales son aquellas que han sido impurificadas por la acción de contaminantes, sufriendo una pérdida en su calidad que puede ser mejorada por la acción de diversos tratamientos. Se caracterizan por acarrear desechos de origen humano y animal, desperdicios caseros, desechos industriales, corrientes pluviales y contaminantes originados por la actividad agrícola. (Ramalho, 1993).

Los sólidos orgánicos contenidos en las aguas residuales usualmente son de origen animal y vegetal, lo cual incluye productos de desecho de seres vivos, materia muerta, microorganismos e incluso compuestos orgánicos sintéticos. Este tipo de sólidos se encuentran sujetos a degradación en compuestos más simples por la acción biológica de bacterias y otro tipo de microorganismos vivos. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

En el caso de las aguas residuales originadas por desechos humanos, la forma más usual en que los contaminantes llegan al agua es mediante los sistemas hidráulicos de los retretes de los sistemas sanitarios. A las aguas residuales originadas de esta manera se les conoce como aguas negras y usualmente se encuentran contaminadas con heces y orina. Además, es posible que los desechos animales contaminen el agua al ser lavados en el suelo o en las calles generando aguas negras. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Las aguas negras, que se encuentran contaminadas con materia fecal y orina de origen humano y animal, son las que requieren más atención y cuidado por parte de las autoridades competentes debido a que pueden contener microorganismos perjudiciales al ser humano, por lo que su tratamiento seguro y eficaz constituye el principal problema de acondicionamiento de las aguas negras para su disposición, sin que éstas representen un peligro para la salud pública. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Generalmente la cantidad de sólidos en las aguas residuales provenientes de desechos humanos y animales es pequeña, siendo alrededor del 0.1% en peso total. Sin embargo, es la fracción que presenta el mayor inconveniente para el tratamiento y disposición final de las aguas negras, pudiendo ser de origen orgánico o inorgánico, encontrándose a su vez en forma suspendida o disuelta según las características específicas del sólido. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Por otra parte, las aguas grises son todas aquellas originadas por las manipulaciones domésticas que involucran lavado de ropa, limpieza en general, preparación de alimentos y desperdicios de cocina, exceptuando las aguas provenientes de los retretes. Se caracterizan porque usualmente pueden contener jabones, desinfectantes y detergentes domésticos, además de restos orgánicos como grasas, cabello, restos de alimentos y otros desechos caseros que contaminan el agua. (Duttle, 1990).

La lluvia también juega un papel importante en la generación de aguas residuales ya que puede depositar cantidades variables de agua en el suelo, causando que ésta escurra en la superficie arrastrando consigo partículas contaminantes de basura, polvo y tierra. Éstas aguas de lavado de las calles y corrientes pluviales pueden tener efectos contaminantes significativos al igual que las aguas de origen agrícola, ya que pueden acarrear pesticidas y fertilizantes consigo, alterando significativamente su calidad. (Ramalho, 1993).

Otro tipo de actividad generadora de aguas residuales es la industrial. Para su tratamiento y eliminación deben tomarse en cuenta las precauciones necesarias para asegurar así que éstas no representen algún tipo de peligro para la población dado que pueden contener especies químicas potencialmente tóxicas, siendo necesario un tratamiento previo a su descarga al cuerpo receptor correspondiente. Las características y disposiciones en su manejo dependerá de la actividad industrial de las cuales provengan las aguas negras así como del cuerpo receptor al cual se incorporarán. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

### **1.2.2. Contaminación biológica de las aguas negras**

Winkler, (1996) indica en su libro *“Tratamiento biológico de aguas de desecho”* que todo cuerpo de agua natural saludable posee una capacidad limitada de autopurificación la cual se debe a pequeñas cantidades de microorganismos presentes en el agua, quienes utilizan como alimento cierta parte de la materia orgánica contaminante presente. Cuando esta capacidad se altera o se agota, el cuerpo incrementa sus niveles de contaminación y el ecosistema que vive en él y en sus alrededores se ven afectados.

Las aguas negras se caracterizan por contener una amplia variedad de microorganismos en su composición, siendo su presencia uno de los motivos principales de la importancia de su tratamiento y control en base a regulaciones ambientales que permiten que el equilibrio entre el cuerpo receptor y su entorno sea el adecuado. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

La contaminación biológica de las aguas negras ocurre por la presencia de bacterias, dada su procedencia. Las bacterias pueden clasificarse como parásitas si viven a expensas de otro organismo vivo huésped, o bacterias saprófitas si se alimentan de materia orgánica muerta, causando la descomposición de los sólidos orgánicos presentes. Por esta característica, este último tipo de bacterias es sumamente importante en el tratamiento y disposición de las aguas negras generadas por un ente emisor. (Winkler, 1996).

Los microorganismos presentes en las aguas negras se pueden clasificar como aquellos que requieren de oxígeno para poder desarrollarse y sobrevivir y los que no lo necesitan. Aquellos que lo necesitan son llamados aerobios, y lo aprovechan en forma de oxígeno molecular disuelto en el agua para llevar a cabo su proceso metabólico. Éstos, al alimentarse de materia orgánica llevan a cabo un proceso de degradación de sólidos orgánicos conocida como descomposición aerobia. (Winkler, 1996).

Por otra parte, aquellos microorganismos que no pueden existir en presencia de oxígeno disuelto son conocidos como anaerobios. Éstos obtienen el oxígeno necesario para desarrollarse a partir del contenido en sólidos orgánicos y de algunos inorgánicos, el cual se hace aprovechable en la degradación anaerobia de los sólidos presentes. (Winkler, 1996).

En algunos casos, la degradación de la materia orgánica ocurre por la adaptabilidad de ciertas bacterias aerobias a desarrollarse en medios que presentan ausencia de oxígeno disuelto, conociéndose como bacterias aerobias facultativas. De forma contraria, algunas bacterias anaerobias facultativas pueden adaptarse a medios que contienen oxígeno disuelto, siendo esta característica muy importante en el tratamiento de aguas negras. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

### **1.2.3. Calidad del agua**

Según Dierging (2009), la calidad del agua se refiere a la descripción de la condición del agua respecto a sus características para a un propósito en específico. Para describir dicha calidad, Davis y Masten (2004) indican que existen cuatro parámetros distintos:

- a) Físicos: Se refieren a la apariencia del agua y características físicas de la misma, tales como temperatura, sólidos disueltos totales (SDT), color, olor, sabor, turbidez y conductividad. (Davis y Masten, 2004).
  
- b) Químicos: Abarca la identificación de los componentes del agua y sus concentraciones como el pH, dureza, aniones (como  $\text{CN}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), cationes (como  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ), grasas y aceites, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), diversas especies orgánicas y también metales pesados como mercurio, cromo y plomo. (Davis y Masten, 2004)

- c) Microbiológicos: Hacen referencia a la concentración de organismos como virus, bacterias, protozoarios y helmintos en el agua. La determinación bacteriológica más frecuente estima la cantidad de microorganismos del grupo coliforme. (Davis y Masten, 2004).
- d) Radiológicos: Establecen la radioactividad del agua, debiéndose solamente considerar en zonas donde ésta pueda tener contacto con algún tipo de sustancia radiactiva. (Davis y Masten, 2004).

#### **1.2.4. Demanda bioquímica de oxígeno**

Cuando materia orgánica ingresa en un cuerpo de agua, ésta representa una fuente de nutrientes, por lo que los microorganismos aeróbicos presentes consumen el O<sub>2</sub> disuelto a medida que llevan a cabo la degradación de los nutrientes, quienes ejercen una demanda sobre la disponibilidad de O<sub>2</sub> presente. Así, la desoxigenación del cuerpo de agua contaminado con materia orgánica es proporcional a la cantidad de O<sub>2</sub> requerido para la degradación de la misma. (Winkler, 1996).

La cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para oxidar materia orgánica de tipo carbónica y nitrogenada mediante procesos aerobios para obtener energía útil en sus procesos vitales es conocida como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y se expresa en mg O<sub>2</sub>/L (equivalente a ppm O<sub>2</sub>). De tal forma que mientras mayor sea la concentración amoníaco-nitrógeno o de carbono orgánico degradable, el valor de la DBO aumentará. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Si la materia orgánica es degradada mediante procesos anaerobios, una parte es utilizada en la síntesis de más bacteria microbiana, de modo que la población de microorganismos aumenta. De no ingresar una mayor cantidad de nutrientes al medio, cierta fracción de los microorganismos existentes morirá, siendo utilizados por el resto para su desarrollo, desintegrándose y regresando la cantidad de población microbiana a su nivel original. (Winkler, 1996).

Generalmente, las aguas negras de orígenes doméstico e industrial poseen altos niveles de DBO, las cuales si se descargaran a cuerpos de agua receptores sin haber recibido un tratamiento previo, agotarían el oxígeno disuelto, disminuyendo y afectando la diversidad de la vida acuática de forma seria, razón por la cual es importante el control de este parámetro al finalizar los tratamientos de aguas residuales. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Puesto que la oxidación biológica continúa indefinidamente, se ha fijado como parámetro que la medición de la DBO se realice en condiciones aeróbicas por 5 días a 20 °C (68 °F), ya que en aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a este nivel, representa en promedio un 65% a 70% de la materia orgánica degradable. Al resultado de esta prueba se le conoce como DBO<sub>5</sub>. (Romero, 1996).

#### **1.2.5. Demanda química de oxígeno**

Según Russell (2012) en su libro *“Tratamiento de aguas residuales: Un enfoque práctico”*, a diferencia de la DBO que se basa en la disminución del oxígeno disuelto por la acción de microorganismos bajo condiciones de tiempo y temperatura controladas que oxidan carbono orgánico, la demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de todas las sustancias susceptibles a ser oxidadas presentes en el agua utilizando ácido crómico como agente oxidante fuerte.

Algunas sustancias inorgánicas como sulfuros, tiosulfatos, sulfitos, nitritos y hierro ferroso son oxidables con ácido crómico, contribuyendo al incremento del valor de la DQO de una muestra de agua, motivo por el cual este parámetro no es aconsejable para determinar el contenido orgánico de la misma. Por ello, la DQO siempre será mayor que la DBO ya que la DQO siempre oxidará especies que la DBO no puede oxidar. (Russell, 2012).

El estándar estimado de la relación existente entre la DBO y la DQO para aguas residuales de origen doméstico y sanitarias de una planta de tratamiento de agua es de 1 unidad de DBO  $\approx$  0.64–0.68 unidades de DQO para la misma muestra de agua analizada. Cabe mencionar que al igual que la DBO, la DQO también se expresa como mg O<sub>2</sub>/L (equivalente a ppm O<sub>2</sub>). (Russell, 2012).

#### **1.2.6. Sólidos totales disueltos**

Se refieren a todos los residuos sólidos filtrables provenientes de una muestra de agua (como sales, residuos orgánicos e inorgánicos) a través de una membrana porosa de 2.0  $\mu$ m. Su determinación se basa en filtrar un volumen de agua conocido para luego evaporarlo a 105 °C hasta que alcance un peso constante el cual es registrado y comparado con el volumen de agua original, para determinar su concentración en mg/L. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

#### **1.2.7. Grupo coliforme**

El grupo Coliforme se caracteriza por agrupar bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas en forma de bacilos, gramnegativas que no forman esporas. Suelen habitar los tractos intestinales de los seres humanos y otros mamíferos, pero también pueden hallarse en otros ambientes como el suelo y en plantas. Dentro del grupo Coliforme se encuentra el subgrupo de los coliformes fecales cuyo origen es principalmente fecal y comprende principalmente la *Escherichia Coli* y algunas cepas de *Enterobacter* y *Klebsiella*. (Romero, 1996).

Los microorganismos del grupo Coliforme no son perjudiciales. Sin embargo, junto con ellos, los seres humanos y animales pueden expulsar otros microorganismos patógenos responsables de causar ciertas enfermedades. Al ser estos otros microorganismos difíciles de detectar en agua y encontrarse presentes en concentraciones pequeñas, se tiende a utilizar al grupo Coliforme, numeroso y fácil de detectar, como indicador de microorganismos patógenos. (Ramalho, 1993).

Este grupo de bacterias puede sobrevivir a períodos largos en el agua pero no se puede reproducir adecuadamente en dicho ambiente. Es por ello que su presencia puede deberse a contaminación fecal más allá de a un crecimiento por condiciones favorables. Además, debido a su mejor supervivencia en el agua que la mayoría de microorganismos patógenos, la ausencia de coliformes es un indicador fiable de que no existen más organismos dañinos presentes en el medio. (Davis y Masten, 2004).

### **1.2.8. Importancia del tratamiento de las aguas negras**

El inconveniente de brindar una disposición final efectiva a las aguas negras fue imponiéndose debido al uso del agua como vehículo para arrastrar los desechos de la actividad humana doméstica e industrial. Con el desarrollo de los suministros de agua a las poblaciones, se hizo necesario encontrar métodos para disponer de las aguas negras generadas, con lo que surgieron las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Mientras incrementaba la población urbana y la demanda de agua para acarrear desechos, también lo hacía de forma proporcional el volumen de las aguas negras, evidenciando la ineficacia de los métodos de tratamiento de aguas residuales utilizados para ese entonces tales como la irrigación, la disposición superficial y la dilución. Esto derivó en el desarrollo de nuevos métodos de tratamiento de las aguas negras previo a su disposición final mucho más efectivos. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

El tratamiento de las aguas negras es importante para conservar las fuentes de abastecimiento de agua para uso doméstico, industrial y agrícola, lo cual previene enfermedades para los seres humanos que están en contacto con ella y que la requieren para su supervivencia. Esto también evita la muerte de la flora y fauna que habita en los ecosistemas acuáticos y reduce los costos de mantenimiento en la industria. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

### 1.2.9. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

Una planta de tratamiento de agua residuales (PTAR) es una instalación que mejora los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales provenientes de un ente generador a través de diversos procesos físicos, químicos y biológicos que retiran los contaminantes del agua para evitar daños al ambiente y a la salud de todos los seres vivos que puedan entrar en contacto con ella o la reutilicen para un fin en específico. (Russell, 2012).

Según Henry y Heinke (1999), la selección de los procesos de tratamiento depende del tipo de fuente de agua y calidad deseada, pero generalmente las PTAR basan su funcionamiento en las siguientes operaciones unitarias:

- Floculación.
- Filtración.
- Digestión (oxidación).
- Sedimentación.
- Desinfección.

La degradación de la materia presente en el agua en los distintos procesos que posee una PTAR puede llevarse a cabo de forma aerobia o anaerobia, los cuales se diferencian en que el tratamiento aerobio ocurre en presencia de oxígeno, mientras que el anaerobio no. El tipo de tratamiento a elegir depende de varios factores, tales como la eficiencia esperada, el entorno y el tipo de agua a tratar. Sin embargo, el factor más determinante es el área con la que se cuenta para el diseño de la PTAR. (Recinos y Barrios, 2010).

Usualmente se utilizan plantas aerobias cuando se cuenta con grandes extensiones de terreno o con terrenos con una topografía de gran pendiente lo cual facilita el flujo del agua por gravedad, mientras que las plantas anaerobias se utilizan cuando los espacios son más reducidos, siendo éstas una alternativa subterránea. Es común que en una PTAR se combinen procesos aerobios y anaerobios debido a sus buenos resultados en el mejoramiento de la calidad del agua residual previo a su descarga a un cuerpo receptor o su reutilización. (Recinos y Barrios, 2010).

### **1.2.10. Tratamiento preliminar**

Este tratamiento es útil para facilitar los procesos involucrados en los tratamientos posteriores, permitiendo incrementar la eficiencia de los mismos al reducir únicamente parámetros físicos, al mismo tiempo en el que se evita dañar las demás unidades de tratamiento de la PTAR al eliminar de la corriente de agua sólidos mayores flotantes y pesados así como cantidades excesivas de aceites y grasas. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

La eliminación de materia flotante de acuerdo a su tamaño se realiza mediante el proceso de cribado, el cual consiste en la retención de los mismos a través de barreras de rejillas de diversas longitudes. Por otra parte, se suelen utilizar trampas de grasa para retener por flotación el material graso que pueda contener la corriente de agua. En el tratamiento previo, también es usual colocar cajas de excedencias para evitar que el caudal de agua que ingresa a la PTAR exceda el de diseño, protegiendo la infraestructura existente. (Davis y Masten, 2004).

### **1.2.11. Tratamiento primario**

Es utilizado para retirar la mayoría de los sólidos suspendidos que no fueron eliminados en el tratamiento preliminar. En esta etapa se utilizan tanques de sedimentación, los cuales funcionan haciendo disminuir la velocidad de las aguas residuales para que puedan sedimentarse los sólidos, eliminándolos en una proporción del 40% al 60%. La remoción puede incrementarse al agregar floculantes que aglutinen los sólidos coloidales. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

El tratamiento primario regula algunos parámetros fisicoquímicos como lo es la reducción de la DBO, al mismo tiempo en que únicamente permite que circule al resto de la planta una mezcla homogénea principalmente líquida. Los sólidos sedimentados en los tanques de sedimentación son convertidos en lodos, los cuales deben ser tratados en otra fase del tratamiento. (Recinos y Barrios, 2010).

### **1.2.12. Tratamiento secundario**

Este tratamiento permite regular los parámetros fisicoquímicos del agua al eliminar los componentes orgánicos presentes mediante procesos biológicos, utilizando bacterias principalmente aerobias, pudiéndose incluir en algunas PTAR, unidades para eliminar fósforo y nitrógeno. (Recinos y Barrios, 2010).

El tratamiento secundario es comparable con la etapa de autopurificación de un cuerpo de agua natural debido a que en él, los microorganismos aerobios degradan la materia orgánica a sólidos inorgánicos estables, causando una reducción de la DBO. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Generalmente en este tratamiento se utilizan filtros goteadores con tanques de sedimentación secundaria, tanques de aeración (de ser un proceso aeróbico), filtros percoladores a través de los cuales escurre el agua y lagunas estabilizadoras. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Los filtros percoladores son ampliamente utilizados en las PTAR ya que su eficiencia en la remoción de carga biológica es alta. En ellos, el líquido fluye por las aberturas que hay en el medio, en donde crecen microorganismos que forman una película. Debido a la acción de las fuerzas de Van der Waals, la materia orgánica se acerca al medio filtrante y son captadas. (Tebbutt, 1997).

### **1.2.13. Tratamiento terciario**

Ramalho (1993) en su libro *“Tratamiento de aguas residuales”* indica que el tratamiento terciario es un tratamiento avanzado, ubicado previo a la descarga hacia el cuerpo de agua receptor a través del cual se busca aumentar la calidad del agua tratada en el tratamiento secundario convencional mediante la mejora de sus parámetros fisicoquímicos o microbiológicos. De este tratamiento se obtiene agua tratada con una calidad mejorada.

Este tratamiento permite eliminar del agua tratada excesos de nutrientes, compuestos tóxicos o microorganismos patógenos. Algunos tipos de tratamientos terciarios consisten en separación de sólidos en suspensión, intercambio iónico, cloración, ozonación, eliminación de especies orgánicas por adsorción en carbón activado y ósmosis inversa. (Ramalho, 1993).

#### **1.2.14. Tratamiento de lodos**

Los lodos son subproductos sólidos obtenidos del tratamiento de agua residual en una PTAR, los cuales deben ser estabilizados mediante procesos aerobios o anaerobios para tratar su composición, olor, consistencia y contenido patógeno, y así poderles brindar una disposición final en específico, la cual generalmente consiste en su secado y enterramiento o en su utilización como fertilizante luego de la reducción de su humedad. (Recinos y Barrios, 2010).

#### **1.2.15. PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar**

Aguilar (2008) indica que en el año 2008, las máximas autoridades de la Universidad Rafael Landívar fijaron como prioridad la instalación de un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en las instalaciones del Campus Central a fin de cumplir con las normativas ambientales del país.

Fue así que, según datos proporcionados por el Departamento de Mantenimiento de la Universidad, en el año 2009 se inició con la construcción de una PTAR tomando en consideración la población estudiantil, docente y administrativa de aquel entonces (13,600 personas), proyectada hacia 30 años.

En base a una demanda proyectada para el año 2039 de 20,084 personas, Aguilar (2008) estimó para el diseño de la PTAR que el caudal medio de agua residual que podría estarse descargando hacia el río Contreras debería oscilar entre un valor de 8.10 L/s y 10.80 L/s.

Según el Departamento de Mantenimiento de la Universidad, la PTAR del Campus Central cuenta con dos líneas de operación para tomar en cuenta el crecimiento poblacional proyectado. Es por ello que la planta cuenta con dos unidades depuradoras por tratamiento, a excepción de la estación de cloración. En la actualidad únicamente se utiliza la línea 1.

Otro dato relevante proporcionado por el Departamento de Mantenimiento es que en ningún punto se utilizan sistemas de bombeo o equipos eléctricos ya que el agua fluye por gravedad. Además, a diario dos operarios brindan mantenimiento a la PTAR y se aseguran que el proceso se lleve a cabo correctamente.

El agua residual que ingresa a la PTAR inicialmente es tratada mediante un tratamiento preliminar. Para ello se hace pasar el agua a través de un canal de excedencias con el fin de regular el caudal de ingreso, evitando que éste se eleve sobre el caudal de diseño debido al agua de lluvia. El agua excedente se envía directamente a la salida de la PTAR. (Recinos y Barrios, 2010).

**Figura 1.** Canal de excedencias de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



Fuente: Recinos y Barrios, 2010.

Posteriormente el agua es tratada mediante cribado en un canal de rejillas, cuyo objetivo es el de evitar que ingresen a la PTAR sólidos en suspensión mayores a 1". Los desechos acumulados en las rejillas son eliminados manualmente por los operarios de la PTAR. (Recinos y Barrios, 2010).

Una vez retirados los sólidos de mayor tamaño, el caudal fluye a través de una trampa de grasas para eliminar materia menos densa que el agua que pueda dañar el resto de las unidades de tratamiento. Finalmente el agua se hace pasar en un sedimentador primario para retirar sólidos menores en suspensión. Los lodos sedimentados en este proceso son trasladados a la unidad de digestión de lodos. (Recinos y Barrios, 2010).

**Figura 2.** Sedimentador primario de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



Fuente: Recinos y Barrios, 2010.

Al salir del sedimentador primario, el agua fluye hacia un filtro percolador en el cual se lleva a cabo un tratamiento secundario de tipo biológico aeróbico. En este proceso el agua pasa a través de un lecho biológico filtrante de 1.50 m de profundidad en donde microorganismos utilizan la materia orgánica presente para sus procesos de síntesis, transformándola en compuestos sedimentables. (Recinos y Barrios, 2010).

Luego de su paso por el filtro percolador, el agua se dirige hacia un sedimentador secundario en el cual los sólidos producidos en el tratamiento anterior son sedimentados en el fondo y, al igual que en el sedimentador primario, los lodos producidos son trasladados a la unidad de digestión, para finalmente trasladarlos al patio de secado y brindarles una disposición final. (Recinos y Barrios, 2010).

**Figura 3.** Filtros percoladores de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



Fuente: Recinos y Barrios, 2010.

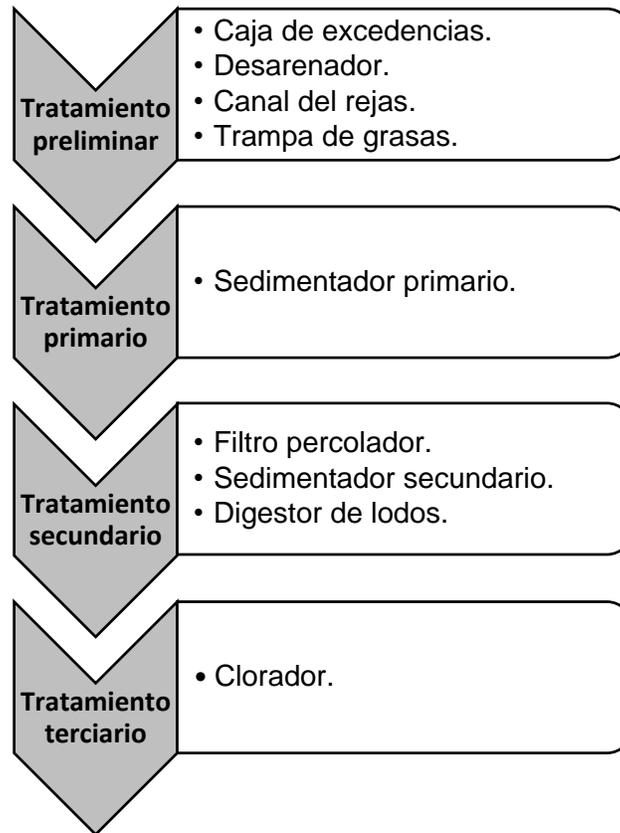
Por otro lado, el agua que proviene del sedimentador secundario es clorada previo a su descarga hacia el río Contreras con una solución de pastillas de AquaChlor Duraclor (tricloro) a concentraciones que, según ha indicado el Departamento de Mantenimiento, han variado a lo largo de los años entre 2 ppm y 3 ppm. La solución de cloro es dosificada mediante un clorador que utiliza agua potable para solubilizar las pastillas del desinfectante.

**Figura 4.** Clorador de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 5.** Unidades de tratamiento de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



Fuente: Elaboración propia, con datos de Recinos y Barrios (2010).

### 1.2.16. Desinfección como tratamiento terciario

Debido al pequeño tamaño que poseen muchos de los microorganismos presentes en el agua residual, no es posible garantizar su eliminación total en los tratamientos que involucran procesos de coagulación o filtrado. Por ello, es usual llevar a cabo una desinfección del agua para asegurar la eliminación de microorganismos potencialmente dañinos. (Tebbutt, 1997).

La desinfección de una corriente tratada previo a su descarga retardará las reacciones de autpurificación en el cuerpo de agua receptor. Adicional a ello, el tratamiento por desinfección puede derivar en la formación de productos de reacción que resultan de la interacción entre los compuestos orgánicos presentes en el agua y los desinfectantes. (Tebbutt, 1997).

Según Romero (1996) en un proceso de desinfección usual, la tasa de eliminación de un microorganismo está dada por la Ley de Chick, la cual establece que la rapidez con que disminuye la cantidad de microorganismos es proporcional al número de ellos. Dicha tasa de desinfección equivale al producto del negativo de la constante de velocidad de reacción  $K$  para un desinfectante en particular y un número  $N$  de los microorganismos en caso, siguiendo la *Figura 6*:

$$\frac{dN}{dt} = -KN$$

**Figura 6.** Tasa de desinfección. (Romero, 1996).

Al integrar la tasa de desinfección descrita en la *Figura 6* y cambiarla a base 10, despejando para un tiempo de contacto  $t$ , se obtiene la *Figura 7*, en donde  $k = 0.4343K$ ,  $N_0$  equivale al número inicial de microorganismos y  $N_t$  al número de microorganismos en un tiempo  $t$ . (Romero, 1996).

$$t = \frac{1}{k} \log \left( \frac{N_0}{N_t} \right)$$

**Figura 7.** Tiempo de desinfección. (Romero, 1996).

Debido a que  $N_t$  nunca tendrá un valor de cero, es usual indicar la eliminación de un microorganismo como un porcentaje no superior al 99.9%. Cabe mencionar que la constante de tasa de reacción dependerá principalmente del tipo de desinfectante pero también de la concentración del desinfectante en el agua, la temperatura del medio, el pH y otros factores de aspecto ambiental. (Romero, 1996).

En el tratamiento de agua, la desinfección se utiliza para eliminar los microorganismos patógenos, pero no cumple una función esterilizadora, que es aquella utilizada para eliminar todos los organismos vivos presentes en el agua, ya que los requerimientos normales para el agua potable de consumo humano se basan solamente en la eliminación de aquellos microorganismos patógenos en concentraciones que puedan causar enfermedades. (Davis y Masten, 2004).

### 1.2.17. Cloración del agua

El cloro y sus compuestos son frecuentemente utilizados como sustancias desinfectantes debido a sus diversas ventajas, entre las cuales se mencionan las siguientes, según Tebbutt (1997):

- Sus costos son bajos en comparación con otros químicos.
- Se encuentra disponible como gas, líquido o en forma granular.
- Su aplicación es fácil debido a su alta solubilidad en condiciones normales de operación (7000 mg/L a 20 °C y 1 atm, siendo insoluble a la misma condición de presión, pero a 100 °C).
- Es tóxico para la mayoría de los microorganismos patógenos, causando la inhibición de sus actividades metabólicas.

La desinfección de agua con cloro no sigue el comportamiento descrito en la *Figura 6* y *Figura 7*, ya que la tasa de desinfección para este desinfectante se encuentra en función del tiempo de contacto  $t$ , del número y clase de microorganismo, de la dosis de cloro, del tipo de cloro residual, del pH del medio y de la temperatura, principalmente (Romero, 1996).

$$\frac{dN}{dt} = -KNt$$

**Figura 8.** Tasa de desinfección con cloro. (Romero, 1996).

$$t^2 = \frac{2}{k} \log \left( \frac{N_0}{N_t} \right)$$

**Figura 9.** Tiempo de desinfección con cloro. (Romero, 1996).

Según Romero (1996), para un pH equivalente a 7, en la *Figura 9*, los valores de  $k$  equivalen a  $1.6 \times 10^{-2}/s$  para residuos de cloro libre y  $1.6 \times 10^{-5}/s$  para residuos de cloro combinados.

La forma gaseosa del cloro es considerada la forma más económicamente viable para llevar a cabo el proceso de desinfección en plantas de tratamiento de agua grandes. Por otra parte, las plantas pequeñas suelen utilizar cilindros de 45 a 68 kg de cloro, pudiendo extraer hasta 19 kg/día de cloro gaseoso por cilindro, el cual se dosifica mediante cloradores. (Romero, 1996).

Pueden utilizarse también compuestos de cloro en forma líquida como hipoclorito de sodio NaClO, o como sólido en forma de hipoclorito de alto grado, HTH o hipoclorito de calcio Ca(ClO)<sub>2</sub>. Generalmente los hipocloritos son utilizados en plantas pequeñas o en aquellas que no cuentan con dosificadores adecuados para cloro en estado gaseoso. (Romero, 1996).

El Ca(ClO)<sub>2</sub> comercial posee un 70% a 74% de cloro y se distribuye en forma granulada o de tabletas, oscilando su solubilidad entre los 215 y 234 g/L, mientras que el NaClO comercial se encuentra en forma líquida y cerca del 12% y 15% de su composición es cloro. Es importante mencionar que todas las soluciones de NaClO son inestables y se degradan a una mayor velocidad que las de Ca(ClO)<sub>2</sub>, tal como se observa en la *Tabla 1*. (Romero, 1996).

**Tabla 1.** Estabilidad de soluciones de hipoclorito de sodio.

<b>Porcentaje de cloro (%)</b>	<b>Concentración de cloro (g/L)</b>	<b>Vida media a 25 °C (Días)</b>
3	30	1700
6	60	700
9	90	250
12	120	180
15	150	100

Fuente: Romero, 1996.

La dosificación de los hipocloritos al agua se realiza usualmente a través de dispositivos cuya capacidad de cloración debe satisfacer la demanda de cloro requerida y tener una capacidad superior a la necesaria ante cualquier eventualidad. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

### 1.2.18. Factores que afectan la eficiencia de desinfección del cloro

Metcalf et. al. (1991) indica en su libro "*Wastewater Engineering: Treatment, disposal and reuse*", que la eficiencia bactericida de los compuestos de cloro se ve afectada por diversos factores entre los cuales se mencionan:

- a) Mezclado inicial: Se ha demostrado que la eficiencia bactericida en la aplicación de cloro en agua que fluye bajo un régimen altamente turbulento ( $Re > 10^4$ ) es dos veces mayor que cuando el cloro se añade por separado al mismo medio. (Metcalf et. al, 1991).
- b) Tiempo de contacto: Es uno de los factores más importantes. Mientras mayor sea el tiempo de contacto, mayor será la efectividad de desinfección. Las bacterias que forman esporas son muy resistentes al cloro y requieren de mayor tiempo de contacto. (Metcalf et. al, 1991).
- c) Características del agua residual: En aguas turbias que contienen partículas sólidas, la efectividad del cloro disminuye debido a que los microorganismos puede cubrirse al encapsularse entre las partículas presentes en el agua, evitando así el contacto directo con el cloro, sobreviviendo a su acción desinfectante. (Metcalf et. al, 1991).

Por ello, la naturaleza del tratamiento previamente usado en cualquier PTAR también tendrá un efecto sobre el proceso de cloración. Como se verá más adelante, ciertos valores de pH y temperatura del agua también hacen variar la eficiencia de la cloración. (Metcalf et. al, 1991).

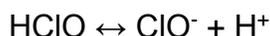
- d) Características de los microorganismos: Mientras mayor sea el número de bacterias a destruir mayor es el tiempo de contacto requerido. Además, el tipo de bacteria también influye ya que algunas mueren fácilmente en contacto con cloro mientras que otras son muy resistentes, como las que producen esporas. (Metcalf et. al, 1991).

### 1.2.19. Cloro libre y combinado

Al entrar en contacto con el agua, el cloro diatómico reacciona con ésta formando ácido hipocloroso y clorhídrico (ionizado totalmente en forma de  $H^+$  y  $Cl^-$  por tratarse de un ácido fuerte), como lo describe la *Ecuación 5*, disminuyendo la alcalinidad del agua por los ácidos formados. La hidrólisis se efectúa de forma completa si el  $pH > 3$  para concentraciones de cloro  $< 1000$  mg/L. (Romero, 1996).



**Figura 10.** Reacción entre cloro y agua.

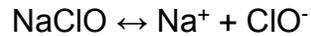


**Figura 11.** Disociación del ácido hipocloroso.

El ácido hipocloroso HClO, el cual es el desinfectante más efectivo, también puede ionizarse como lo describe la *Figura 11* en forma de iones hidrógeno e hipoclorito  $ClO^-$  (el cual es de 80 a 100 veces menos eficaz que el HClO para eliminar E. Coli), cuyas concentraciones varían dependiendo del pH del medio. Ambas especies químicas disueltas en agua, HClO y  $ClO^-$ , forman el cloro libre. (Romero, 1996).

A valores de pH ácidos, la disociación del HClO se inhibe, de tal forma que a  $pH \leq 7$ , el residuo es de HClO por su concentración predominante; a  $pH = 7.7$ , los residuales de HClO y  $ClO^-$  son aproximadamente similares mientras que a valores de  $pH \geq 9$ , el residuo predominante es de  $ClO^-$ , siendo la desinfección más efectiva en niveles ácidos de pH debido a la presencia de una mayor concentración de HClO.

Por otra parte, si el cloro es dosificado en el agua tratada en forma de hipoclorito de sodio NaClO, éste también se disociará como se muestra a continuación en la *Figura 12*, pero el ion hipoclorito reaccionará con el agua formando ácido hipocloroso e hidroxilo (véase *Figura 13*) incrementando la alcalinidad del agua. (Romero, 1996).

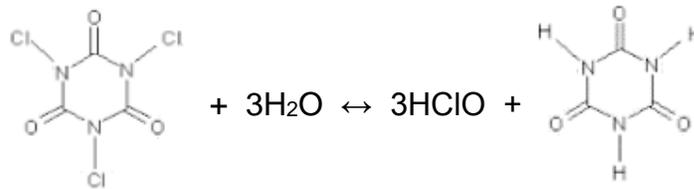


**Figura 12.** Disociación del hipoclorito de sodio.



**Figura 13.** Reacción del ion hipoclorito con agua.

El ácido tricloroisocianúrico  $\text{C}_3\text{Cl}_3\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_3$ , también conocido comercialmente como tricloro –TCCA– es capaz de generar cloro libre en forma de ácido hipocloroso al entrar en contacto con agua. Como subproducto de la reacción se genera ácido isocianúrico  $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_3$  el cual no causa reacciones secundarias. (Romero, 1996).

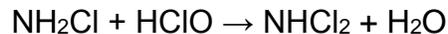


**Figura 14.** Reacción del ácido tricloroisocianúrico con agua.

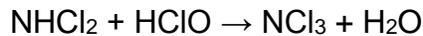
Si existe amoníaco presente en el agua hipoclorada, el HClO reaccionará con él produciendo especies químicas nitrogenadas como monoclaramina  $\text{NH}_2\text{Cl}$ , dicloramina  $\text{NHCl}_2$  y tricloramina  $\text{NCl}_3$ . Al cloro contenido en el agua en forma de cloraminas se conoce cloro combinado. (Romero, 1996).



**Figura 15.** Formación de monoclaramina.



**Figura 16.** Formación de dicloramina.



**Figura 17.** Formación de tricloramina.

El cloro combinado es más estable que el libre, pero es menos efectivo como desinfectante. Para cierta mortalidad de microorganismos con residual constante, el cloro combinado requiere cien veces el tiempo de contacto requerido por el libre. (Tebbutt, 1997).

La efectividad desinfectante de los residuales libres y combinados es variable en todos los casos. Algunos autores como Romero (1996), señalan que el ácido hipocloroso HClO es 100 veces más efectivo que el ClO<sup>-</sup> y 150 veces más que la monocloramina NH<sub>2</sub>Cl como se observa en la *Tabla 2*.

**Tabla 2.** Efectividad desinfectante del cloro libre y combinado.

<b>Residual</b>	<b>Efectividad relativa</b>
HClO	1
ClO <sup>-</sup>	1/100
NH <sub>2</sub> Cl	1/150
NHCl <sub>2</sub>	1/80
NCl <sub>3</sub>	> 1/80

Fuente: Romero, 1996.

Adicional a la naturaleza de los residuales de cloro presentes en el agua, la efectividad de la desinfección depende de algunos aspectos que intervienen en la cloración de forma determinante. Tal es el ejemplo de los sólidos suspendidos, que pueden funcionar de barrera a los microorganismos, resguardándolas del efecto tóxico del cloro sobre su metabolismo. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

La materia orgánica que pueda encontrarse suspendida en el agua así como cationes de hierro y manganeso puede además reaccionar con el cloro utilizado, disminuyendo la efectividad desinfectante del mismo. Sucede algo similar con los nitritos, quienes reaccionan con el cloro libre y lo eliminan. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Debido a sus ventajas, la cloración con residuos libres es la frecuentemente utilizada. Entre estas puede mencionarse el hecho que es posible obtener una desinfección efectiva utilizando un tiempo de contacto de 10 minutos, mientras que los residuos combinados requieren al menos de 60 minutos. Además, no se requiere variar considerablemente la cantidad de cloro libre con leves variaciones en las condiciones de operación. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Cuando el agua se trata, la proporción relativa entre el cloro libre y el combinado es importante debido a la capacidad oxidativa de los residuales libres sobre la materia orgánica. Es por ello que al efectuar la cloración del agua y ésta se desee tratar mediante residuales libres, la fracción de estos residuos debe ser de al menos el 85%. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

La concentración mínima de residuales de cloro recomendable para asegurar una desinfección efectiva varía en función del pH del agua, del tipo de residuo y por ende, del tiempo debido a que cada especie química posee una eficiencia diferente. Debido a ello, para los residuales libres se requiere un menor tiempo y una concentración más baja, contrario a lo que sucede con los residuos combinados, tal y como se observa en la *Tabla 3*. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

**Tabla 3.** Concentraciones mínimas de cloro residual para desinfección efectiva.

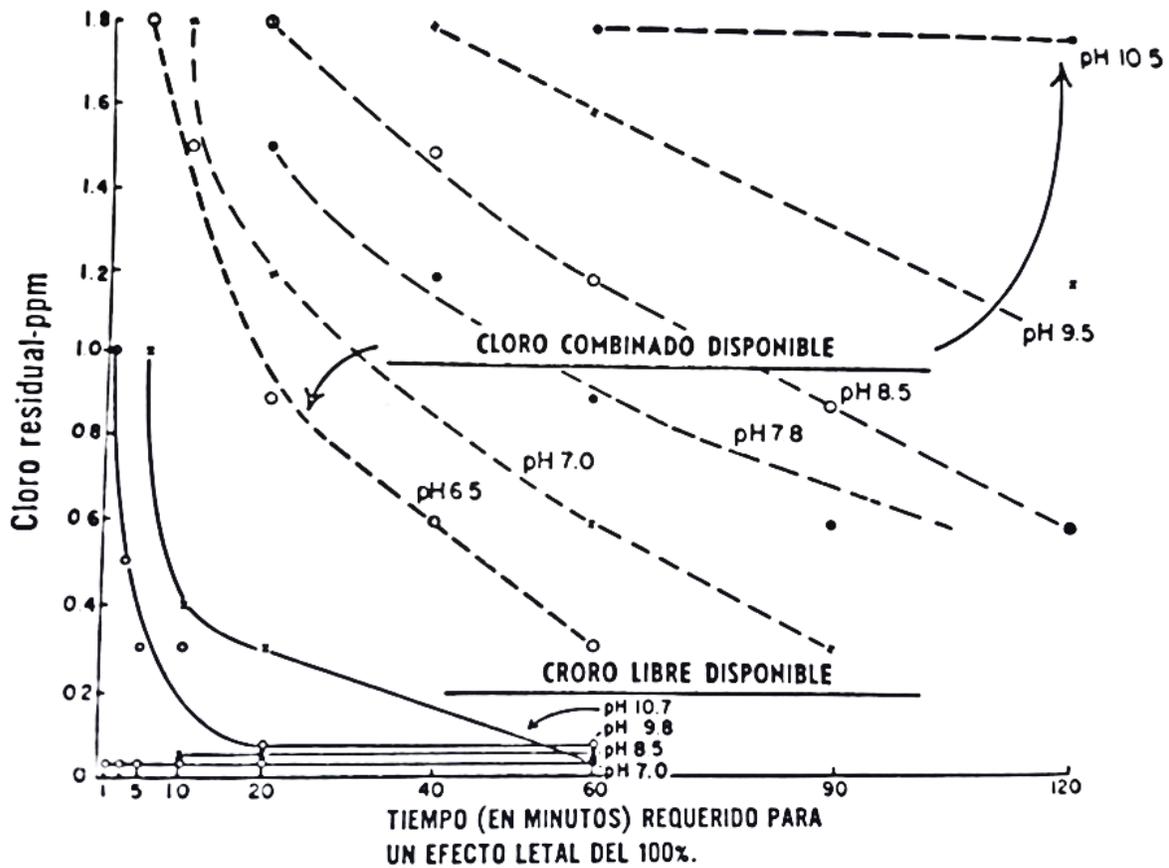
pH	Concentración mínima para residuales libres con $t > 10$ min (mg/L)	Concentración mínima para residuales combinados con $t > 60$ min (mg/L)
6.0	0.2	1.0
7.0	0.2	1.5
8.0	0.4	1.8
9.0	0.8	1.8
10.0	0.8	No es práctico

Fuente: Departamento de Sanidad de Nueva York, 2005.

Como se describe en la *Gráfica 1*, los tiempos de contacto  $t$  para una desinfección efectiva del 99.9% son considerablemente menores en pH ácidos tanto para los residuales libres como para los combinados. Sin embargo, éstos últimos por ser desinfectantes débiles, siempre requerirán de concentraciones superiores a las de los libres. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

El pH del agua tratada afecta mayormente el comportamiento del cloro combinado debiéndose incrementar la concentración para tener el mismo efecto desinfectante, a condiciones de temperatura constante, ya que este parámetro también puede interferir (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

**Gráfica 1.** Efecto del pH en el tiempo de desinfección con residuales de cloro.



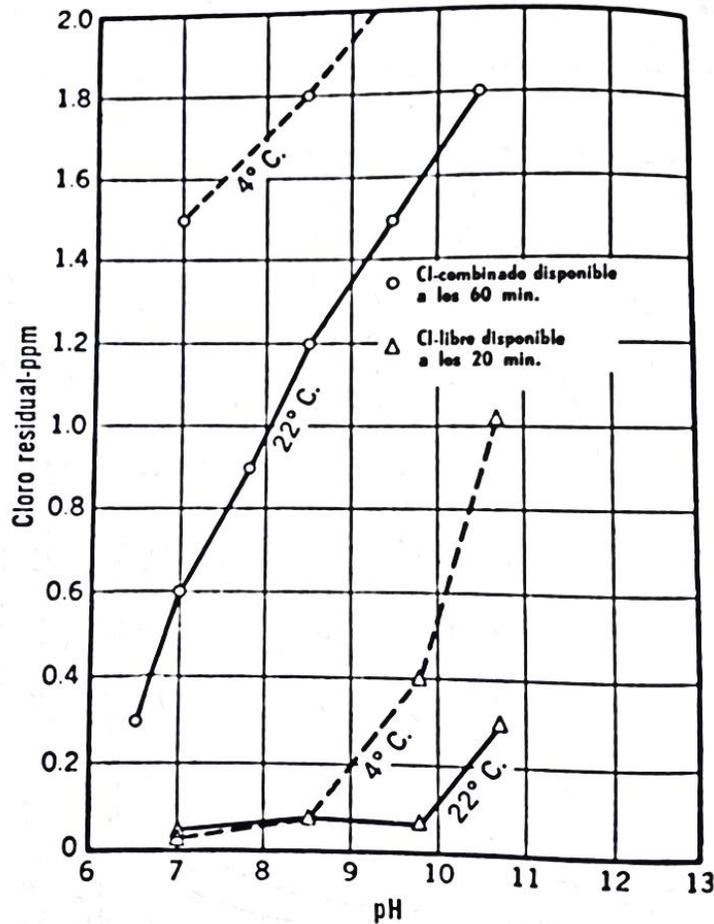
Fuente: Departamento de Sanidad de Nueva York, 2005.

La capacidad desinfectante del cloro también se ve afectada por la temperatura, pero lo hace de forma diferente según sea el tipo de residuos. En el caso del cloro combinado, la concentración debe incrementarse al registrarse una disminución de la temperatura como se observa en la *Gráfica 2*. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

La temperatura es un parámetro que debe ser tomado en consideración al momento de fijar una unidad de cloración para el agua tratada, pero no es tan determinante como el pH del medio debido a que este último sí tiene un mayor efecto sobre los procesos que involucran desinfección con residuales combinados de cloro. Dada esta sensibilidad, el uso de estos residuales no es tan recomendada como sí ocurre con los residuales libres. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Siguiendo el análisis de la temperatura en la concentración de los residuales, la concentración del cloro libre tiende a ser aproximadamente la misma en medios neutros siendo el incremento es más notorio en pH alcalinos. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

**Gráfica 2.** Efecto de la temperatura en la concentración de residuales de cloro.



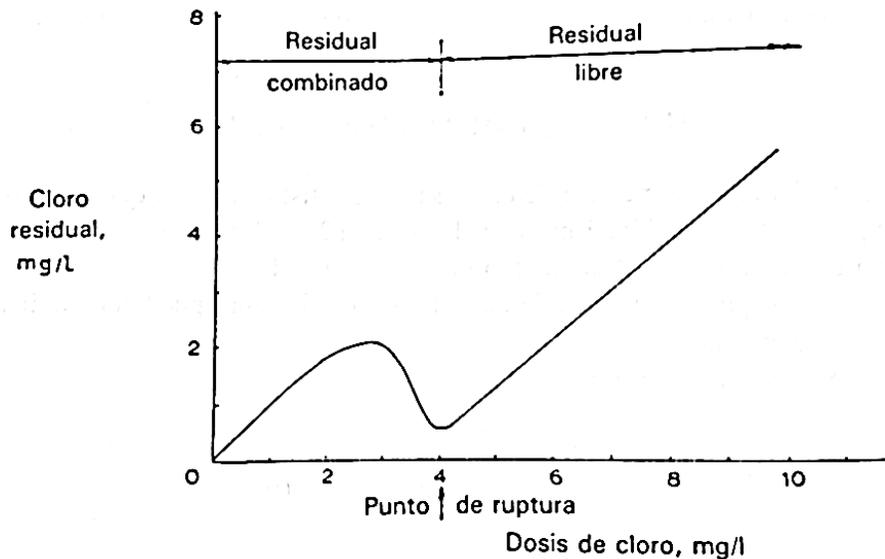
Fuente: Departamento de Sanidad de Nueva York, 2005.

### 1.2.20. Curva de demanda de cloro

Debido que el cloro es un agente oxidante fuerte, reacciona con una gran variedad de sustancias disueltas en el agua tratada, causando una variación en la concentración del cloro presente. Este comportamiento es descrito a través de una curva característica de demanda de cloro. (Romero, 1996).

En la tendencia de esta curva se observa un aumento inicial y luego un decremento en la concentración de los residuales de cloro presentes en el agua para luego sufrir un nuevo aumento, en un punto conocido como de quiebre o ruptura, lo cual se observa en la *Gráfica 3*. (Tebbutt, 1997).

**Gráfica 3.** Curva de demanda de cloro.



Fuente: Tebbutt, 1997.

Inicialmente, el cloro reacciona con los agentes reductores presentes en el agua sin formar residuales detectables debido a su baja concentración, compensando de esta manera la demanda de cloro que dichos agentes requieren. Luego de cumplir esta demanda, el cloro tiende a reaccionar con el amonio  $\text{NH}_4^+$  y las aminas orgánicas disueltas, incrementando el residual de cloro combinado. (Tebbutt, 1997).

Luego de que la totalidad de los compuestos orgánicos nitrogenados hayan reaccionado, el cloro adicional agregado genera cloro residual libre, el cual causa la oxidación de las cloraminas generadas y por ende, una disminución de la concentración del cloro residual. Además, dado que se trata de un proceso oxidativo, ocurre la formación de compuestos químicos adicionales como óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$  y nitrógeno  $\text{N}_2$ . (Tebbutt, 1997).

Una vez finalizada completamente la oxidación de todos los compuestos nitrogenados que constituyen el residual combinado y alcanzado el punto de ruptura, inicia la formación de cloro residual libre, con lo cual su concentración se incrementa de forma proporcional a la dosis adicionada, siendo esta última un parámetro importante en el tratamiento de aguas debido a que de ella depende la formación de un residual en específico. (Tebbutt, 1997).

La demanda de cloro puede variar según el tipo y origen del agua tratada, e incluso para la misma la demanda dependerá de la dosis aplicada, del tiempo de contacto del agua con el cloro y de algunos aspectos como el pH y la temperatura. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).

Durante la cloración, el cloro interactúa con las sustancias que se encuentran presentes en el agua generando así parte de la demanda de cloro descrita en la curva de demanda de cloro. En dichas reacciones puede darse la formación de compuestos organoclorados llamados trihalometanos –THM–. (Romero, 1996).

El trihalometano de mayor interés en el agua tratada mediante cloración es el cloroformo  $\text{CHCl}_3$ , aunque también pueden formarse otras especies como diclorobromometano  $\text{CHCl}_2\text{Br}$  o tribromometano  $\text{CHBr}_3$ . Esto dependerá de las especies químicas presentes en el agua tratada. (Romero, 1996).

Existe cierta preocupación por la presencia de trihalometanos en el agua tratada especialmente por cloración, debido a que éstos son asociados con cáncer y está demostrado que en dosis altas causan esta enfermedad en roedores. (Romero, 1996).

Como prevención, es razonable controlar la formación de trihalometanos reemplazando el cloro como desinfectante por otras alternativas como dióxido de cloro  $\text{ClO}_2$  u ozono  $\text{O}_3$  los cuales no forman residuos nocivos en contacto con la materia orgánica del agua residual. (Romero, 1996).

### 1.2.21. Otros métodos de desinfección en tratamiento de agua

Por lo general, los desinfectantes utilizados en el tratamiento de agua pueden clasificarse como agentes oxidantes y agentes físicos. Uno de los desinfectantes más utilizados es el cloro libre, aunque también suele utilizarse ozono, luz UV y dióxido de cloro. Estos desinfectantes tienen diferentes formas de aplicación en el agua y provienen de diversas fuentes químicas como se muestra en la *Tabla 4*. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

**Tabla 4.** Comparación de las fuentes de los desinfectantes utilizados en tratamiento de agua.

Desinfectante	Fuentes
Cloro libre	La fuente primaria es administrada en forma de gas (cloro gaseoso $\text{Cl}_2$ ), sólido (tabletas de tricloro o hipoclorito de calcio) o líquido (solución de hipoclorito de sodio). La generación de cloro libre ocurre en el sitio.
Cloro combinado	Se administra amonio en forma de solución acuosa, gas o sólido en forma de sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . El cloro y el amonio se mezclan en el sitio para formar cloro combinado.
Dióxido de cloro	Se genera en el sitio utilizando clorito de sodio $\text{NaClO}_2$ como fuente primaria y cloro gaseoso $\text{Cl}_2$ , ácido hipocloroso $\text{HClO}$ o ácido clorhídrico $\text{HCl}$ . Permanece en forma gaseosa en el agua tratada.
Ozono	Fabricado en el sitio utilizando un generador de ozono que funciona haciendo entrar en contacto aire seco u oxígeno puro con una tensión eléctrica alta.
Luz UV	Utiliza lámparas UV de presión baja de alta intensidad (254 nm) o de presión media dentro de un tanque que permite que el agua tratada y la luz UV entren en contacto.

Fuente: Mihelcic y Zimmerman, 2012.

Cada uno de los desinfectantes utilizados en el tratamiento de agua posee una efectividad de eliminación diferente que dependerá generalmente del tipo de microorganismo al cual sea expuesto según la *Tabla 5*. Como puede observarse, la mayoría de los desinfectantes presenta una excelente efectividad en presencia de bacterias. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

**Tabla 5.** Comparación de efectividad bactericida entre desinfectantes.

Microorganismo	Desinfectante				
	Cloro libre	Cloro combinado	Dióxido de cloro	Ozono	Luz UV
Bacterias	Excelente	Bueno	Excelente	Excelente	Bueno
Virus	Excelente	Pasable	Excelente	Excelente	Pasable
Protozoos	Pobre	Pobre	Bueno	Bueno	Excelente
Endosporas	Bueno	Pobre	Pasable	Excelente	Pasable

Fuente: Mihelcic y Zimmerman, 2012.

Según Mihelcic y Zimmerman (2012), existen otras consideraciones importantes que deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar un desinfectante en específico. Estas se detallan en la *Tabla 6*.

**Tabla 6.** Consideraciones adicionales de los desinfectantes utilizados en tratamiento de agua.

Desinfectante	Consideraciones
Cloro libre	Aunque la desinfección con cloro libre es muy efectiva y con ventajas en el costo, su uso preocupa por la formación de trihalometanos –THM– cancerígenos, por la reacción con materia orgánica disuelta en el agua a tratar.
Cloro combinado	La efectividad de eliminación de microorganismos está ligada a la concentración de cloro combinado en el agua a tratar.
Dióxido de cloro	No produce cantidades significativas de THM como subproductos de reacciones con materia orgánica. Requiere un menor tiempo de contacto para eliminar microorganismos debido a que posee un poder oxidante más alto que el cloro libre y no reacciona con el amonio presente en el agua.
Ozono	Es un gas que decae muy rápido bajo condiciones ambientales. La alta alcalinidad, las bajas concentraciones de materia orgánica y temperaturas bajas incrementan la estabilidad de los residuos acuosos de ozono.
Luz UV	Tiene acción germicida al ser utilizada en un rango de longitud de onda de 200 y 300 nm ya que en ese punto el ácido desoxiribonucleico absorbe los rayos UV y lo dañan, eliminando a los microorganismos. Su efectividad de eliminación está ligada a la concentración de sustancias disueltas y materia suspendida en el agua a tratar.

Fuente: Mihelcic y Zimmerman, 2012.

### 1.2.22. Marco legal del tratamiento de aguas residuales en Guatemala

La Constitución de la República de Guatemala, en su artículo 97 indica: “el Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que evite la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico.” Para ello este artículo señala que se dictarán las normas necesarias para garantizar que el aprovechamiento de la fauna, flora, tierra y agua se realice racionalmente evitando su depredación.

Dentro del marco de la normativa legal vigente en Guatemala, se encuentra el Decreto 68-86 llamado “Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente”, en el cual se hace referencia a que para todo proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad que por sus características puede producir deterioro a los recursos naturales renovables o no, al ambiente, introducir modificaciones nocivas o notorias al paisaje y a los recursos culturales del patrimonio nacional, deberá ser necesario previamente a su desarrollo un estudio de evaluación del impacto ambiental.

En el país, existen específicamente dos regulaciones que hacen referencia directamente al tratamiento de aguas residuales. Por un lado, en el *Código de Salud*, promulgado mediante el Decreto 90-97 se asigna la responsabilidad del tratamiento de las aguas residuales al ente generador de las mismas previo a su descarga. Así mismo, en el artículo 97 de esta normativa se prohíbe la descarga de aguas residuales no tratadas en cuerpos receptores de agua como ríos, lagos y lagunas que se encuentren en forma superficial o subterránea. (Lemus y Recinos, 2015).

Por otro lado, casi diez años después es creada la medida más reciente referente al tratamiento de aguas residuales mediante el Acuerdo Gubernativo 236-2006 llamado “*Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*”. Su propósito es el de definir los parámetros y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reúso de las aguas residuales para proteger los cuerpos receptores del impacto de la actividad humana. (Lemus y Recinos, 2015).

El Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos fija en su capítulo V los parámetros y valores de descarga a cuerpos receptores, siendo el Río Contreras uno de ellos, desde entes generadores constituidos previo al año 2006 como lo es la Universidad Rafael Landívar. En el artículo 20 se establecen los siguientes límites máximos permisibles en un plan de cuatro etapas que va desde el año 2011 al 2024. (Véase *Tabla 7*).

**Tabla 7.** Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores de la etapa II del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Fuente: Artículo 20, Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Actualmente, en el 2017 (año de la realización de este estudio), se encuentra en vigencia la etapa II del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, ya que esta fase tiene por fecha máxima de cumplimiento el dos de mayo de 2015, lo cual indica que a partir de ese plazo, las descargas a cuerpos receptores deben cumplir con las especificaciones indicadas en dicha etapa.

En las disposiciones generales del Reglamento se demanda la elaboración del "Manual General del Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos", aprobado mediante el Acuerdo Ministerial 105-2008 por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales en el cual se detallan más aspectos para el seguimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

## **CAPÍTULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El agua es uno de los recursos más importantes de todo ser viviente ya que permite el sostén y la reproducción de los factores bióticos en la Tierra al constituir un elemento fundamental en los procesos bioquímicos que inciden en su desarrollo directo. Es esta característica, junto a su intervención en muchas de las actividades económicas del ser humano, lo que demuestra la importancia en su conservación.

Con el propósito de contribuir al cuidado del agua en Guatemala, se han establecido normativas como el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual entre otros aspectos, requiere a los entes generadores de aguas residuales proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana. Es a partir de estas exigencias que se inician los estudios y gestiones necesarias para instalar una PTAR en el Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.

La construcción de dicha PTAR inicia en el 2009 y entra en funcionamiento en el año 2011. Actualmente en ella se tratan las aguas residuales de la mayoría de los edificios del Campus, a excepción de las del edificio Tec. El efluente tratado de la PTAR mencionada es descargado hacia la microcuenca del río Contreras, la cual también recibe aguas residuales de otros entes generadores de las zonas 10 y 15 de la Ciudad de Guatemala.

La planta trata el agua en tres fases diferentes, consistiendo la terciaria en un tratamiento químico de desinfección con pastillas de tricloro a fin de mejorar la calidad del agua tratada previo a su descarga final hacia el río Contreras. Este tratamiento es fundamental para asegurar el cumplimiento del límite máximo permisible de coliformes fecales presentes en el agua, indicado en el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Con ello se cerciora que el efluente generado contiene un nivel bajo de microorganismos patógenos.

Debido a la necesidad de establecer si la cloración efectuada actualmente como tratamiento terciario en la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael se lleva a cabo de forma adecuada para eliminar microorganismos que puedan causar algún tipo de daño al ser humano, se pretende realizar la evaluación del procedimiento en cuestión.

Este estudio también es necesario para determinar si el tratamiento terciario actual contribuye al cumplimiento de la normativa establecida en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 "*Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos*" y así minimizar el impacto ambiental al río Contreras por la descarga de los efluentes tratados provenientes del Campus.

De esta forma se plantea la pregunta: ¿cumple el proceso de cloración actual de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar con los límites microbiológicos máximos permisibles de coliformes fecales que exige respetar el Acuerdo Gubernativo 236-2006?. De no ser así ¿cómo debería de mejorarse el tratamiento terciario actual para que éste se pueda llevar a cabo de forma correcta?.

## **2.1. OBJETIVOS**

### **2.1.1. Objetivo general**

Evaluar el estado actual del tratamiento terciario de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar durante la estación seca a través de la remoción de la carga microbiológica contaminante en la descarga hacia el río Contreras.

### **2.1.2. Objetivos específicos**

1. Determinar cuantitativamente la carga microbiológica contaminante removida mediante el tratamiento terciario de la PTAR y la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante del mismo tratamiento bajo condiciones normales de operación en estación seca.
2. Comparar la concentración de coliformes fecales presentes en el agua residual tratada en el tratamiento terciario de la PTAR previo a su descarga al río Contreras con el límite máximo permisible de coliformes fecales ( $1 \times 10^5$  NMP/100 mL) establecido en la etapa II del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 bajo condiciones normales de operación en estación seca.
3. Determinar cuantitativamente los parámetros DBO<sub>5</sub>, DQO, STD, pH y temperatura del agua residual en la entrada y salida del tratamiento terciario para establecer una relación con la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante.
4. Plantear una propuesta de mejora para incrementar la eficiencia del tratamiento terciario actual de la PTAR en base a los hallazgos obtenidos.

## 2.2. HIPÓTESIS

La presente investigación no presenta una hipótesis planteada debido a que no es un estudio experimental según Arias y Caballeros, 3ª. Ed. (2012) en su obra *Guía para realizar el trabajo de graduación*.

## 2.3. ELEMENTOS DE ESTUDIO

- a) Carga microbiológica del agua residual al inicio del tratamiento terciario.
- b) Carga microbiológica del agua residual al final del tratamiento terciario.
- c) Parámetros fisicoquímicos del agua residual del tratamiento terciario.
- d) Solución de cloro generada en el clorador.
- e) Caudal de agua residual del tratamiento terciario.

## 2.4. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS DE ESTUDIO

- a) Carga microbiológica del agua residual al inicio del tratamiento terciario:

### **Definición conceptual:**

Producto entre el caudal y concentración de una sustancia o componente determinados de un efluente, expresándose en unidades por día.

### **Definición operacional:**

Cantidad de microorganismos que fluyen diariamente en el agua residual previo a ser tratada en el tratamiento terciario.

- b) Carga microbiológica del agua residual al final del tratamiento terciario:

### **Definición conceptual:**

Producto entre el caudal y concentración de una sustancia o componente determinados de un efluente, expresándose en unidades por día.

### **Definición operacional:**

Cantidad de microorganismos que fluyen diariamente en el agua residual luego de ser tratada en el tratamiento terciario.

c) Parámetros fisicoquímicos del agua residual del tratamiento terciario:

**Definición conceptual:**

Valor utilizado para determinar la calidad física y química que posee el agua. (Romero, 1996).

**Definición operacional:**

Características fisicoquímicas que posee el agua tratada en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central. Según el Departamento de Mantenimiento, en los muestreos de monitoreo en la descarga al río se determinan los parámetros fisicoquímicos de DQO, DBO<sub>5</sub>, pH, temperatura y sólidos suspendidos.

d) Caudal de agua residual:

**Definición conceptual:**

Volumen de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo. Su unidad en el Sistema Internacional es el metro cúbico por segundo (m<sup>3</sup>/s). (RAE, 2014).

**Definición operacional:**

Volumen de agua residual por unidad de tiempo que maneja la PTAR. En su proyección, Aguilar (2008) detalla que en el año 2015 la PTAR manejaría un caudal medio diario de 6.55 L/s.

e) Solución de cloro generada en el clorador:

**Definición conceptual:**

Mezcla homogénea entre un soluto y un solvente en una proporción determinada. (Ramalho, 1993).

**Definición operacional:**

Mezcla homogénea entre tricloro sólido y agua potable en una concentración de 2 ppm de cloro libre según el Departamento de Mantenimiento de la Universidad Rafael Landívar.

## 2.5. ALCANCES Y LÍMITES

Este estudio analiza la remoción de la carga microbiológica contaminante en el agua residual causada únicamente por la presencia de coliformes fecales en el agua residual tratada. No se toman en consideración otros microorganismos que puedan estar presentes en el agua residual.

Como parámetros fisicoquímicos de calidad del agua residual se seleccionaron únicamente la DBO<sub>5</sub>, DQO, pH y temperatura por ser los de mayor relevancia en el análisis de agua residual. Además, para obtener alguna relación existente entre la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante y la concentración de sólidos presentes en el agua se determinaron los sólidos totales disueltos y no los sólidos suspendidos ya que el laboratorio en el cual se analizaron todas las muestras captadas –LAFYM– no realiza este último tipo de análisis.

Debido a los costos del estudio, los resultados obtenidos en la investigación se manejan con un nivel de confianza del 90% y no con uno superior debido a que ello implicaría una mayor cantidad de muestras por analizar. Por otra parte, debido al tiempo disponible para la captación de muestras, se tomaron muestras simples y no compuestas de agua residual tanto en la salida del sedimentador secundario 1 –SSS1– como en la caja de descarga hacia el río –CDR–.

Esta investigación se limita a evaluar únicamente el tratamiento terciario actual de la PTAR del Campus Central durante la estación seca. Los muestreos fueron realizados durante la última semana de abril y la primera de mayo de 2017 durante días de actividades normales en el Campus Central para obtener resultados representativos de la PTAR.

El estudio pretende evaluar el funcionamiento del tratamiento terciario actual de la PTAR bajo condiciones normales de operación lo cual supuso realizar los muestreos de agua residual en días no lluviosos de actividades normales en el Campus Central durante el mismo ciclo académico con el propósito que la población que trata sus aguas en la PTAR fuera aproximadamente la misma.

Se omite el monitoreo del comportamiento nocturno de la PTAR debido a la restricción que existe para ingresar a ella en ese horario, a la falta de equipo automatizado para la toma de datos y también porque el caudal del agua residual a tratar por la actividad nocturna en el Campus Central disminuye según el Departamento de Mantenimiento.

Finalmente, es importante mencionar que en este estudio no se realiza una evaluación de factibilidad económica de las mejoras planteadas para incrementar la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante en el tratamiento terciario ya que ello no figura entre los objetivos planteados para esta investigación, realizada en la PTAR del Campus Central.

## **2.6. APORTE**

A la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar, como precedente para futuras investigaciones y evaluaciones de cada una de sus fases de tratamiento y a la forma en cómo éstas se llevan a cabo dada la escasa bibliografía disponible que existe respecto al tema.

A la microcuenca del río Contreras y su ecosistema, para minimizar el impacto ambiental que la actividad humana en la Universidad Rafael Landívar provoca por descargar sus aguas residuales en ella, contribuyendo así en la conservación de la flora y fauna oriunda de esta área.

A las urbanizaciones aledañas a la Microcuenca del Río Contreras, para evitar la proliferación de enfermedades entre sus habitantes por el contacto directo o indirecto con aguas negras contaminadas provenientes de las instalaciones del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.

A la Universidad Rafael Landívar, para tomar acciones correctivas de determinarse que el tratamiento terciario de la PTAR de su Campus Central es ineficiente, lo cual le permita apearse a su enfoque de protección ambiental mediante el cuidado y preservación del agua.

## CAPÍTULO III MÉTODO

### 3.1. SUJETOS Y UNIDADES DE ANÁLISIS

#### 3.1.1. Sujetos

Para la realización de esta investigación se recabó información de diversas personas que han tenido un acercamiento con la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar y/o cuentan con experiencia en materia de tratamiento de aguas residuales. Éstos se describen a continuación:

- a) Ing. Pablo Bernabé Escobar:  
Jefe del Departamento de Mantenimiento, Dirección de Infraestructura y Servicios Generales del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.
  
- b) Ing. Félix Alan Aguilar:  
Consultor de IAG Consultoría y Construcción. Autor de la propuesta de PTAR construida en el Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.
  
- c) Ing. David Aguilar:  
Gerente técnico de Hydroambiente S.A. Experto en sistemas de tratamiento de aguas y de cloración.
  
- d) Inga. Luisa María Arias:  
Gerente del laboratorio Concalidad en el cual se analizan periódicamente todas las muestras de agua provenientes de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.
  
- e) Héctor Quim:  
Operario encargado desde el año 2013 del mantenimiento de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.

### 3.1.2. Unidades de análisis

Para la realización de esta investigación se recabó información de diversas personas que han tenido un acercamiento con la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar y/o cuentan con experiencia en materia de tratamiento de aguas residuales. Éstos se describen a continuación:

- a) Agua residual proveniente de la entrada y salida del clorador:  
Ubicada en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central.
  
- b) Solución de cloro generada en el clorador:  
Ubicada en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central.
  
- c) Reportes de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos:  
Analizados para todas las muestras tomadas de agua de la PTAR, emitidos por el Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos y Microbiológicos –LAFYM–.
  
- d) Datos históricos de la PTAR del Campus Central:  
Correspondientes al período 2010 – 2016, los cuales no son presentados en esta investigación por motivos de confidencialidad.

## 3.2. INSTRUMENTOS

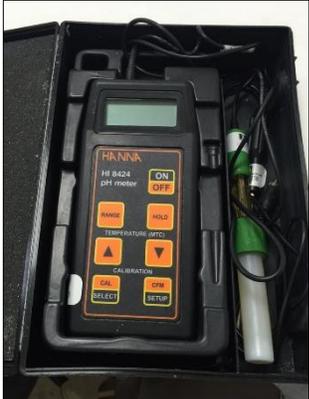
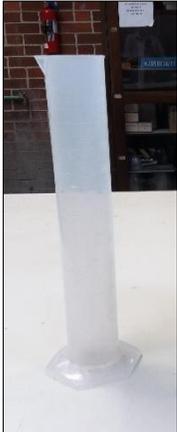
### 3.2.1. Instrumentos y equipo de medición

**Tabla 8.** Instrumentos y equipos de medición utilizados en el estudio.

Instrumento o equipo	Descripción	Imagen
Medidor de cloro libre	Medidor colorimétrico DPD semicuantitativo in situ de cloro libre Microquant Merk®. Número de catálogo: 114976. Rango de detección: 0.25 a 30.0 mg/L de cloro libre.	<p><b>Figura 18.</b> Medidor de cloro libre.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>
Termómetro de queroseno	Termómetro de inmersión. Marca Thermco®. Código de catálogo: ACC1503BLS. Rango de detección: - 20 a +150 °C. Incerteza: ± 0.5 °C.	<p><b>Figura 19.</b> Termómetro de queroseno.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>
Cronómetro	Marca Casio®. Modelo HS-3. Número de catálogo: TPM-HS3. Tiempo mínimo de detección: 1/100 s.	<p><b>Figura 20.</b> Cronómetro utilizado.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 9.** Instrumentos y equipos de medición utilizados en el estudio.

Instrumento o equipo	Descripción	Imagen
Potenciómetro	Potenciómetro portátil. Marca Hanna Instruments®. Modelo: HI 8424. Rango de detección: - 2.00 a 16.00 pH. Incerteza: $\pm 0.005$ pH.	<p><b>Figura 21.</b> Potenciómetro utilizado.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>
Probeta	Probeta de 1000 mL. Volumen mínimo de medición: 10 mL. Incerteza: $\pm 5$ mL.	<p><b>Figura 22.</b> Probeta utilizada.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 3.2.2. Equipo de captación de muestras

**Tabla 10.** Equipo y material utilizado para la captación de muestras.

<b>Equipo para captación de muestras</b>	
<p><b>Figura 23.</b> Equipo y material utilizado para la captación de muestras.</p> 	
<p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	
<b>Descripción</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Cubeta de 10 L.</li><li>2. Recipientes plásticos esterilizados de 1.5 L y 600 mL.</li><li>3. Hielera para transporte de muestras.</li><li>4. Embudo.</li><li>5. Bolsas para desechos.</li><li>6. Etiquetas de identificación de muestras. (Véase <i>Anexos</i> para mayor detalle de las mismas).</li><li>7. Cuerda.</li></ol>	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 3.2.3. Equipo de protección personal

**Tabla 11.** Equipo de protección personal utilizado en la toma de muestras.

<b>Equipo de protección personal</b>	
<p><b>Figura 24.</b> Equipo de protección utilizado en la toma de muestras.</p> 	
<p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	
<b>Descripción</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Bata.</li><li>2. Gafas de protección.</li><li>3. Cubrebocas.</li><li>4. Guantes de látex.</li><li>5. Botas de hule.</li></ol>	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

### **3.3. PROCEDIMIENTO**

#### **3.3.1. Observación preliminar de la situación**

Inicialmente se realizó una visita a la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar el día viernes 08 de julio de 2016 para efectuar una observación preliminar del estado actual del tratamiento terciario de la planta. Esto permitió brindar un mayor enfoque a la investigación.

#### **3.3.2. Búsqueda de información para fijar bases del estudio**

Para fijar las bases bajo las cuales se llevaría a cabo el estudio se procedió a investigar información básica acerca del tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central de la Universidad, realizando consultas con personas que han tenido algún tipo de acercamiento directo con ella.

#### **3.3.3. Determinación del volumen de la cubeta a utilizar**

Previo a la realización del muestreo se determinó el volumen de la cubeta utilizada para la captación del agua residual y la toma del caudal de descarga al río. Para ello, se utilizó una probeta de 1 L con la cual fue llenada la cubeta en diez ocasiones, determinándose así que el volumen de ésta última era de 10 L.

**Figura 25.** Determinación del volumen de la cubeta utilizada.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

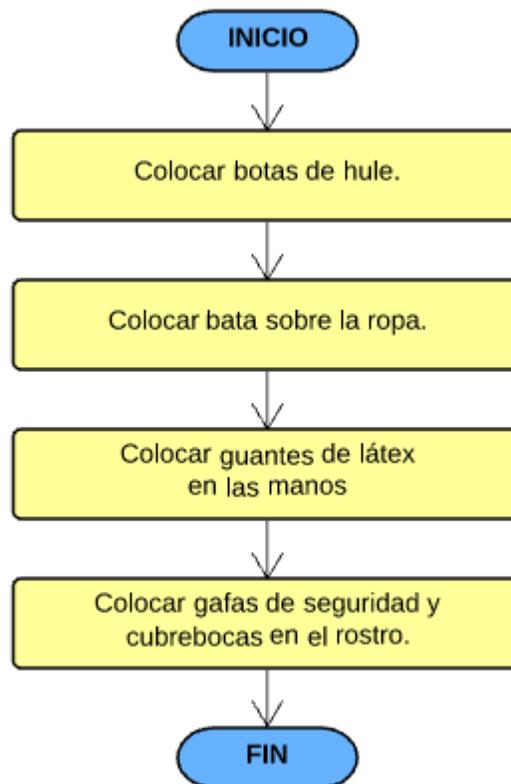
### 3.3.4. Realización del muestreo

La toma de muestras en la PTAR se realizó en base a las directrices establecidas durante la observación preliminar de la situación y con la información recabada (Véase sección 3.4. *Diseño y metodología estadística*). Se identifican cuatro etapas durante la realización del muestreo:

- Etapa I: Preparación del equipo de protección personal.

Previo al ingreso a la PTAR, se colocó el equipo de protección personal debido al riesgo que las aguas residuales representan para la salud. Las gafas, botas y bata fueron lavadas con una solución de cloro al término del muestreo para su posterior reuso, mientras que los guantes y el cubrebocas fueron descartados.

**Figura 26.**  
Preparación del equipo de protección personal.

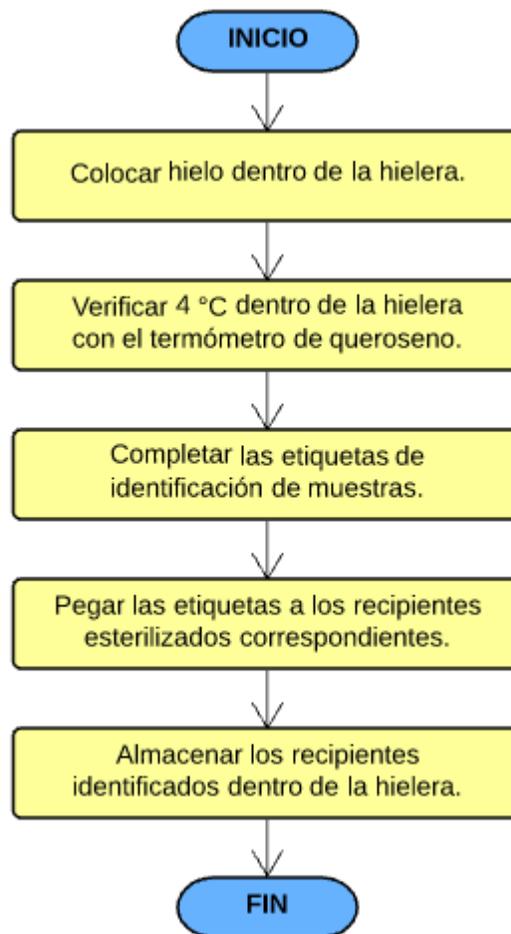


Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Etapa II: Preparación del equipo de captación de muestras.

De igual forma que con el equipo de protección personal, previo al ingreso a la PTAR también se preparó el equipo de captación de muestras. Para ello se colocaron diez libras de hielo dentro de la hielera y se aseguró que la temperatura dentro de ésta fuera igual o inferior a 4 °C a fin de preservar la muestra en óptimas condiciones. Durante la preparación también se identificaron los recipientes utilizados para contener las muestras con las boletas de identificación.

**Figura 27.**  
Preparación del equipo de captación de muestras.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 28.** Uso del equipo de protección personal y de captación de muestras.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 29.** Muestras identificadas almacenadas en hielera.

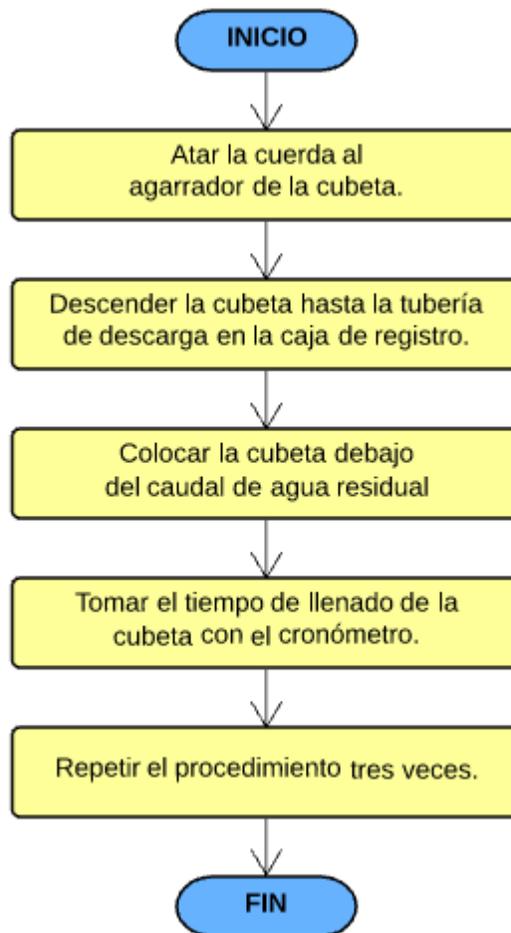


Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Etapa III: Determinación del caudal de descarga al río.

Previo a la toma de las muestras se determinó el caudal de descarga al río (Véase 4.2.7. *Caudal de agua tratada en tratamiento terciario*) a fin de relacionarlo con los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio. Para ello se determinó el tiempo de llenado de una cubeta de 10 L. Por seguridad, se utilizó una cubeta atada a una cuerda debido a que la tubería de salida del agua residual se ubicaba a cierta profundidad de la superficie de la caja de descarga hacia el río –CDR–.

**Figura 30.**  
Determinación del caudal de descarga al río.

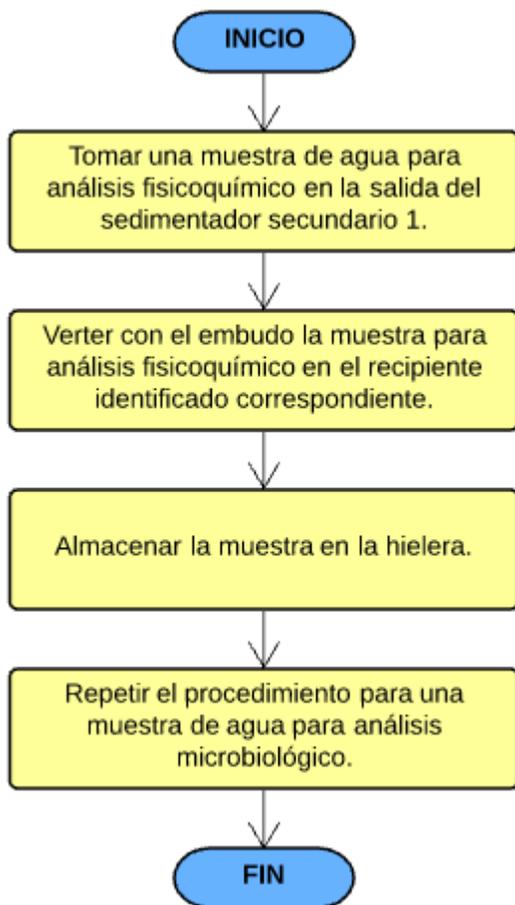


Fuente: Elaboración propia, 2017.

• Etapa IV: Captación de muestras.

La captación de las muestras se realizó previo y luego de la cloración del agua en dos puntos de la PTAR: en la salida del Sedimentador Secundario 1 –SSS1– y en la caja de descarga hacia el río –CDR–.

**Figura 31.**  
Toma de muestra en SSS1.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 32.**  
Toma de muestra en CDR.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 33.** Captación de muestra en SSS1.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 34.** Determinación de caudal y captación de muestra en CDR.

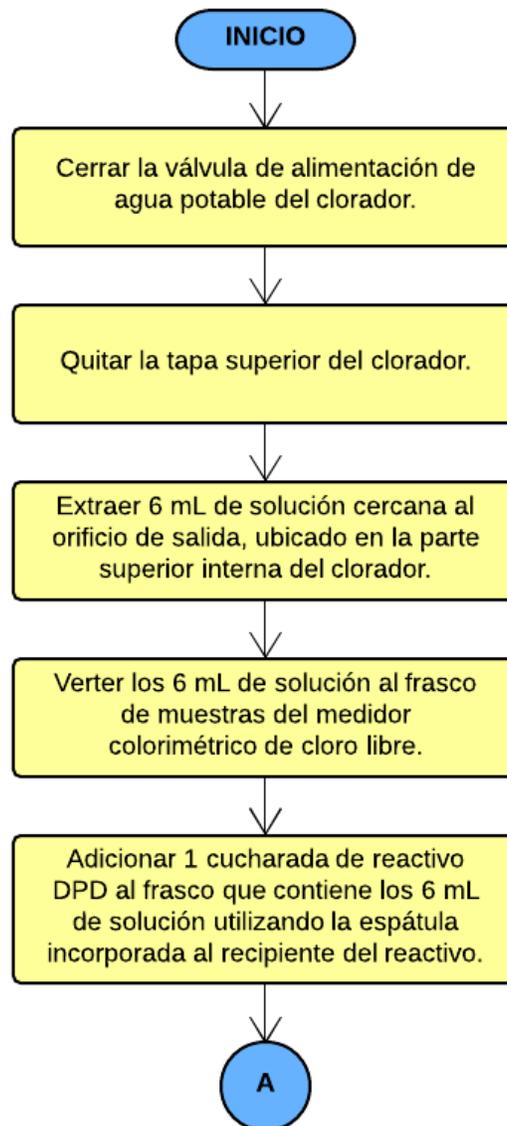


Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 3.3.5. Determinación de dosificación de cloro libre en el clorador

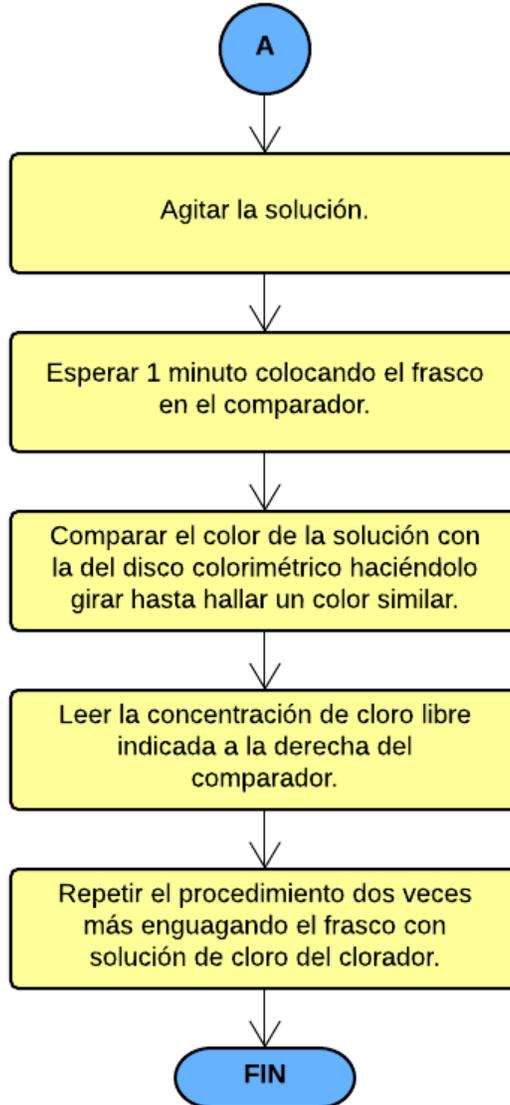
Durante cada muestreo realizado se determinó la dosificación de cloro que manejaba el clorador al momento de tomar las muestras de agua residual para determinar si existía alguna diferencia respecto a la dosificación indicada por el Departamento de Mantenimiento (2 ppm). Para ello se utilizó un medidor de cloro libre y las muestras analizadas fueron tomadas del interior del clorador, el cual según el Departamento de Mantenimiento, maneja dos pastillas diarias.

**Figura 35.**  
Determinación de dosificación de cloro libre en el clorador.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 35.**  
Determinación de dosificación de cloro libre en el clorador.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 36.** Toma de muestra de solución de cloro del interior del clorador.



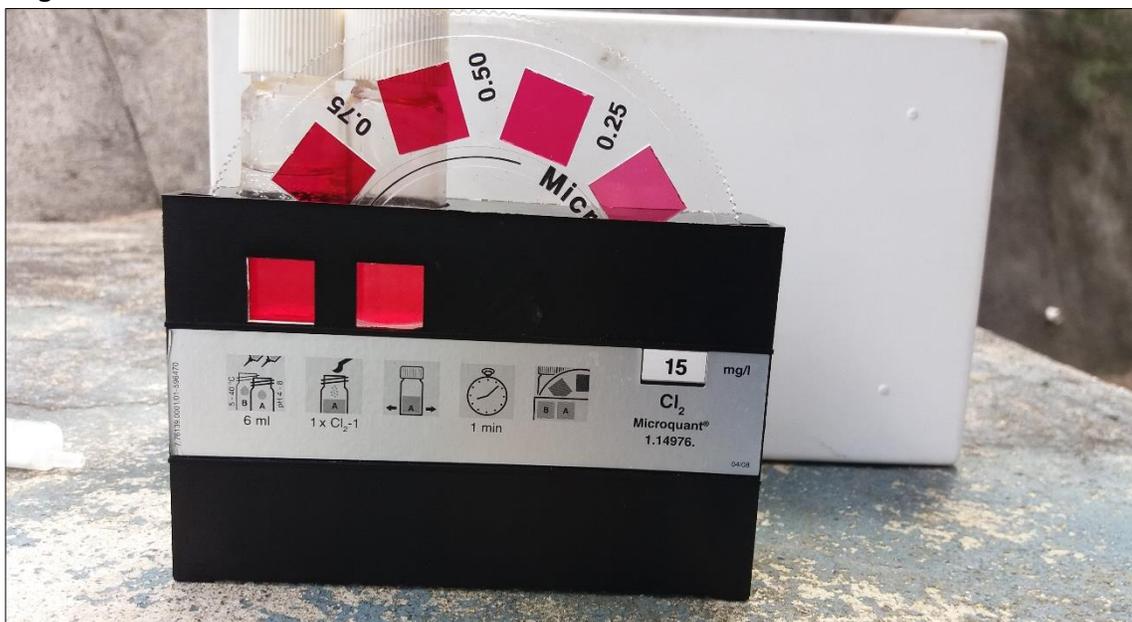
Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 37.** Adición de reactivo DPD a la muestra de solución de cloro.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Figura 38.** Obtención de concentración real de cloro libre en solución del tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 3.4. DISEÑO Y METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

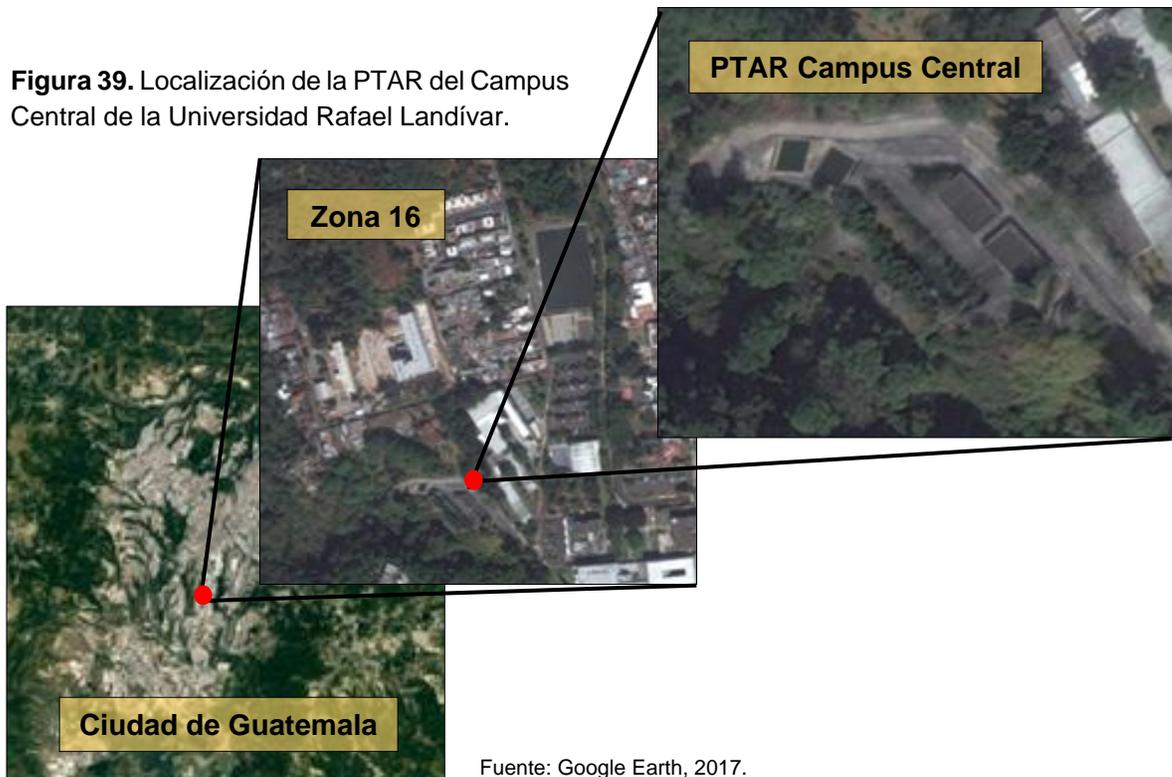
#### 3.4.1. Localización

La PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar se encuentra dentro de las instalaciones del Campus Central, ubicado en Vista Hermosa III, zona 16 de la Ciudad de Guatemala, como se observa en la *Figura 39*. La entrada a la PTAR está señalizada, hallándose detrás del edificio G y a un lado del módulo D. Las coordenadas geográficas del lugar son las siguientes:

**Tabla 12.** Coordenadas geográficas de la PTAR del Campus Central.

Medición	Coordenada geográfica
Latitud	14° 35' 44.33" N
Longitud	90° 29' 11.27" O
Altitud	1470 msnm

Fuente: Lavagnino, 2016.



Fuente: Google Earth, 2017.

### 3.4.2. Número de muestras

Para la evaluación del tratamiento terciario de la PTAR se estimó la cantidad de muestras a analizar en base al método estadístico que propone *Apha et al, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21 ed., 2005*, ya que el objeto de análisis es agua residual cuyas características generalmente no permanecen constantes.

El método propone el uso de una gráfica que posee curvas que representan distintos niveles de confianza en base a la *Figura 40*, la cual relaciona tres variables distintas para un número mínimo de muestras:

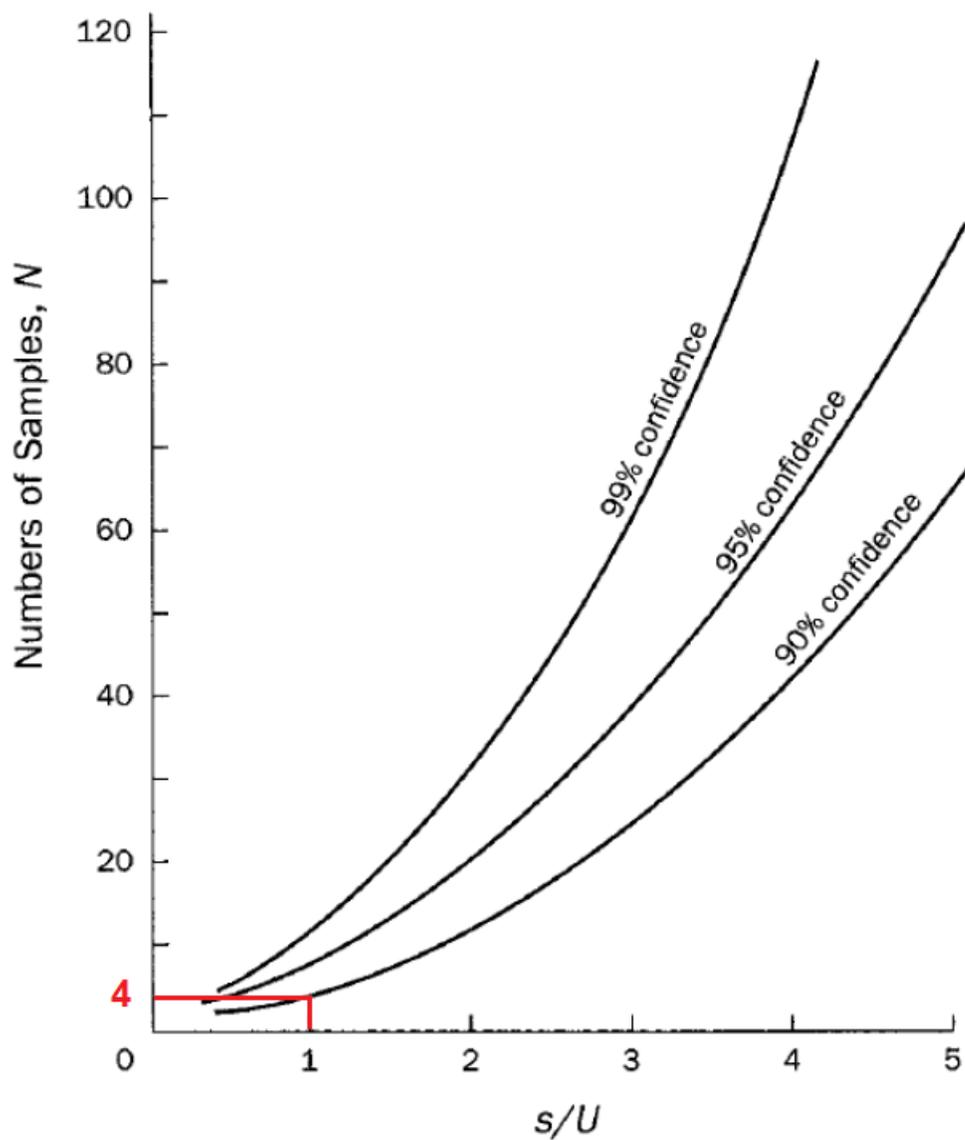
$$N \geq \left( \frac{ts}{U} \right)^2$$

**Figura 40.** Número de muestras. (Apha et al, 2005).

En donde  $N$  representa el número de muestras necesarias para el estudio a realizar,  $t$  el valor de la t-Student para un nivel de confianza dado,  $s$  la desviación estándar y  $U$  el nivel de incerteza aceptable. Además, según la gráfica que ofrece el método utilizado (véase *Gráfica 4*), el nivel de confianza varía entre 90% y 99%, relacionando el número de muestras  $N$  con el cociente  $s/U$ .

Para la investigación realizada, se utilizó un valor de desviación estándar  $s$  de 0.05 mg/L y una incerteza aceptable  $U$  de 0.05 mg/L para todos los parámetros analizados, lo que ofrece un cociente  $s/U$  de 1. También se trabajó con un nivel de confianza del 90%, lo cual significa una cantidad mínima de 4 muestras por punto de muestreo. (véase *Gráfica 4*).

**Gráfica 4.** Determinación del número de muestras.



Fuente: Standard Methods for the examination of water and wastewater, 21 ed., 2005, p. 1-31.

(Modificado).

Siendo,

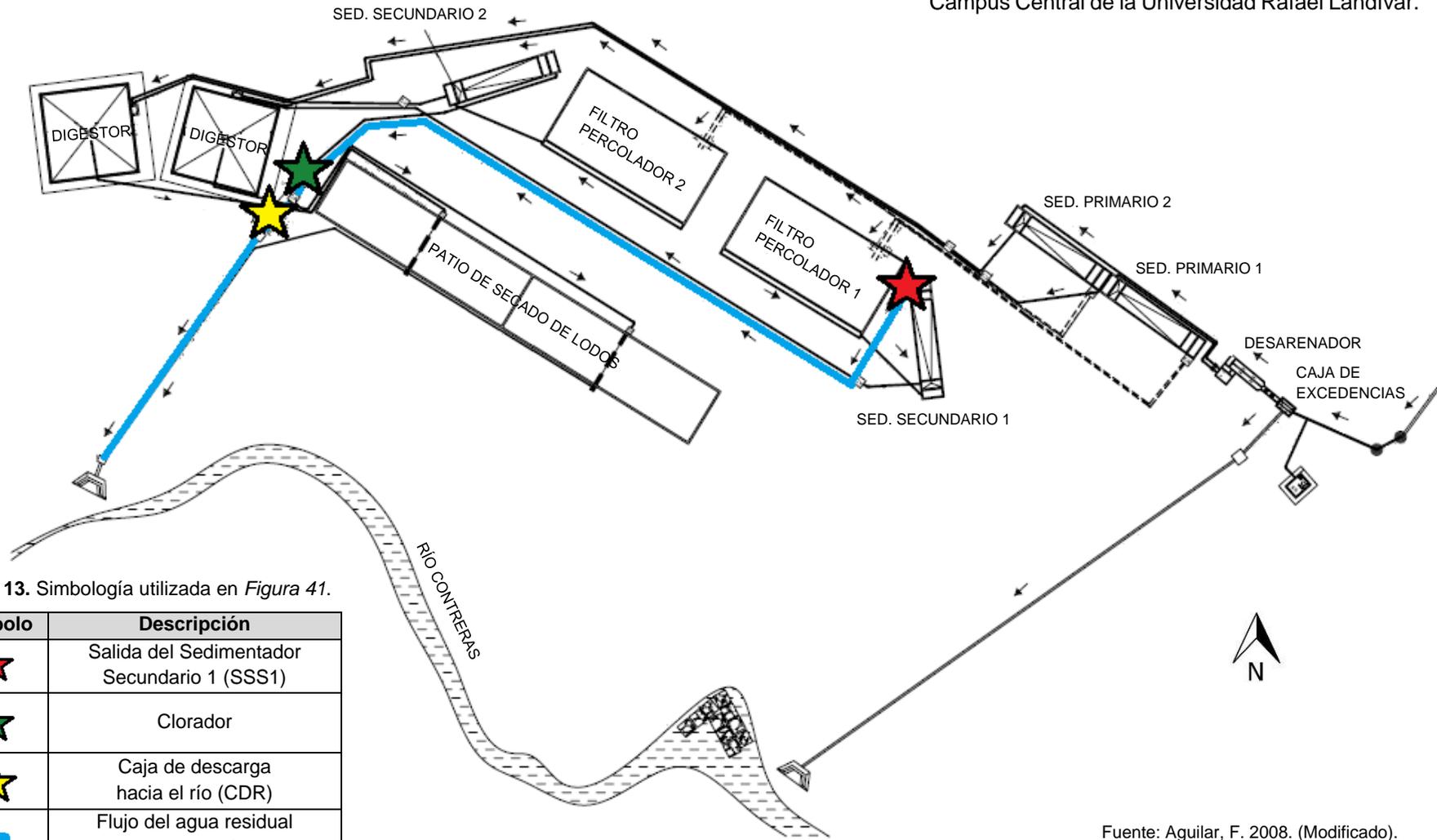
$s = 0.05 \text{ mg/L}$ .

$U = 0.05 \text{ mg/L}$

Nivel de confianza del 90%.

### 3.4.3. Puntos de muestreo

**Figura 41.** Puntos de muestreo en la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.



**Tabla 13.** Simbología utilizada en *Figura 41*.

Símbolo	Descripción
★	Salida del Sedimentador Secundario 1 (SSS1)
★	Clorador
★	Caja de descarga hacia el río (CDR)
—	Flujo del agua residual muestreada

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Fuente: Aguilar, F. 2008. (Modificado).

Durante el estudio se realizaron muestreos en tres puntos de la PTAR: en la salida del Sedimentador Secundario 1 –SSS1– (previo al proceso de cloración), en la caja de descarga hacia el río –CDR– (luego de la adición de cloro) y en el clorador. Se tomaron cuatro muestras tanto en SSS1 como en CDR en base a lo determinado en el método estadístico (Véase 3.4.2. *Número de muestras*). Por otra parte, en el clorador solamente se realizaron pruebas in situ para determinar la concentración de cloro libre en la solución generada con la que se clora.

No fue posible tomar muestras de agua residual inmediatamente antes de su cloración ya que todo el flujo de agua tratada se encuentra confinado en una tubería cerrada en la que no existe alguna toma para captación de muestras, por lo que se decidió muestrear en la salida del Sedimentador Secundario 1, el cual es el punto abierto más cercano previo al clorador.

Según Aguilar (2008), SSS1 y la unidad de cloración se encuentran separados por una tubería de 84.65 m de longitud, mientras que la distancia existente entre CDR y el clorador es de 6.20 m. Es importante mencionar también que debido a que se trata de una tubería cerrada sin ninguna toma de agua, se trabajó bajo la premisa de que el caudal en SSS1 es el mismo que en CDR.

#### **3.4.4. Frecuencia de toma de muestras**

Se realizaron cuatro visitas a la PTAR para la captación de muestras durante la última semana de abril y la primera de mayo de 2017. Todas las muestras fueron tomadas entre las 10:30 am (para SSS1) y 10:40 am (para CDR), ya que según el Departamento de Mantenimiento, en este horario la PTAR maneja el caudal máximo de agua debido al receso de los estudiantes. Todos los muestreos se llevaron a cabo en los mismos espacios de tiempo a fin de obtener resultados representativos y se buscó que tuvieran lugar previo a las vacaciones del primer ciclo 2017 para que la PTAR tratara aguas residuales generadas en días de actividad normal en el Campus Central.

### 3.4.5. Descripción de las unidades experimentales

Cada muestreo en la PTAR se realizó en base a cada una de las unidades experimentales que se describen a continuación:

a) Agua residual proveniente de la entrada del clorador:

Captada en la salida del sedimentador secundario 1 –SSS1–. Se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos para determinar la calidad del agua residual previo a ser clorada en el tratamiento terciario.

b) Agua residual proveniente de la salida del clorador:

Captada en la caja de descarga hacia el río –CDR–, ubicada luego del clorador del tratamiento terciario. Se determinó el caudal de flujo del agua residual y se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos para establecer la calidad de la misma luego ser clorada.

c) Solución de cloro generada en el clorador:

Captada del interior del clorador. Se determinó la concentración de cloro libre presente en la solución para establecer la dosificación de cloro real con la que se lleva a cabo el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central.

### 3.4.6. Metodología de análisis

El análisis de los resultados obtenidos estuvo orientado a la evaluación del tratamiento terciario actual de la PTAR del Campus Central, para lo cual fue necesario el valor de la eficiencia de cloración mediante el cálculo de la eficiencia de remoción de coliformes fecales. Se utilizó la misma metodología de análisis para todos los resultados de los muestreos realizados.

a) Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

**Figura 42.** Eficiencia de remoción de un contaminante. (Parra, 2006).

Donde,

E = Eficiencia (%).

$S_0$  = Carga microbiológica contaminante inicial. (NMP/día).

S = Carga microbiológica contaminante final. (NMP/día).

b) Carga microbiológica contaminante:

$$S = Q \cdot C$$

**Figura 43.** Carga microbiológica contaminante. (MARN, 2008).

Donde,

S = Carga microbiológica contaminante (NMP/día).

Q = Caudal. ( $m^3/día$ ).

C = Concentración del contaminante microbiológico. (NMP/100 mL).

c) Carga microbiológica contaminante removida:

$$S_R = S_0 - S$$

**Figura 44.** Carga microbiológica contaminante removida.

Donde,

$S_R$  = Carga microbiológica contaminante removida (NMP/día).

$S_0$  = Carga microbiológica contaminante inicial. (NMP/día).

$S$  = Carga microbiológica contaminante final. (NMP/día).

d) Caudal promedio:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{n}$$

**Figura 45.** Caudal promedio.

Donde,

$\bar{Q}$  = Caudal promedio (L/s).

$\sum \bar{Q}_i$  = Sumatoria de los caudales obtenidos. (L/s).

$n$  = Número de mediciones realizadas.

La evaluación del tratamiento terciario de la PTAR también fue sustentada mediante el análisis de gráficas realizadas con los datos obtenidos en los cálculos anteriormente descritos. (Véase *Capítulo IV: Presentación y análisis de resultados.*)

**CAPÍTULO IV**  
**PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**4.1. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRATAMIENTO TERCIARIO**

**4.1.1. Infraestructura**

**Tabla 14.** Evaluación preliminar de la infraestructura del tratamiento terciario.

<b>Aspecto evaluado</b>
Infraestructura
<b>Evaluación preliminar</b>
<p>El tratamiento terciario cuenta con una estructura de concreto cuya función es la de proteger al clorador que se encuentra en su interior. Contiguo se encuentran dos cajas de concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) La primera posee dos tuberías de entrada (tanto de la línea 1 y 2 de tratamiento) y una de salida. La adición de la solución de cloro ocurre en la tubería justo antes del paso del agua residual a través de esta caja.</li><li>b) La segunda caja de concreto se ubica previo a la caja de descarga hacia el río –CDR– y cuya función es la homogenizar los caudales provenientes de la línea 1 y 2.</li></ul> <p>La estructura que contiene al clorador es atravesada por dos tuberías de PVC: una que toma agua potable para mezclarla con las pastillas del desinfectante y la segunda que traslada la solución dosificada del clorador hacia la tubería principal de la línea 1 de agua residual para ser clorada. No se cuenta con una segunda tubería que tenga como función clorar la línea 2 si ésta se llegase a necesitar.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 15.** Infraestructura del tratamiento terciario.

Aspecto evaluado	Infraestructura
<p><b>Figura 46.</b> Parte frontal de la infraestructura del tratamiento terciario.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p> <p><b>Figura 47.</b> Parte trasera de la infraestructura del tratamiento terciario.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	
<b>Descripción</b>	
<p>1. Estructura protectora del clorador.</p> <p>2. Caja de adición de cloro.</p> <p>3. Caja homogeneizadora de caudal de descarga.</p>	<p>4. Salida de la solución de cloro.</p> <p>5. Entrada de solución de cloro a tubería principal de línea 1.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 16.** Caja de adición de cloro.

Aspecto evaluado	Infraestructura
<p data-bbox="456 331 1166 363"><b>Figura 48.</b> Interior de la caja de registro de adición de cloro.</p>  <p data-bbox="529 787 854 814">Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	
Descripción	
<p data-bbox="285 940 732 1031"><b>1.</b> Tubería principal de línea 1. (En funcionamiento).</p>	<p data-bbox="870 940 1317 1031"><b>2.</b> Tubería principal de línea 2. (Fuera de servicio).</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

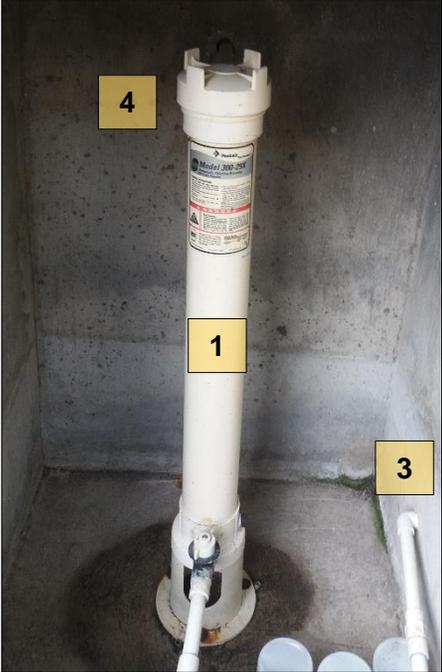
#### 4.1.2. Clorador

**Tabla 17.** Evaluación preliminar del clorador del tratamiento terciario.

Aspecto evaluado
Clorador
Evaluación preliminar
<p data-bbox="237 1541 1385 1738">La unidad de cloración de la PTAR cuenta con un dosificador automático de cloro marca <i>Pentair</i> modelo 300-29X. Posee una válvula alimentadora de agua potable externa y está diseñado para funcionar con tabletas de tricloro, pudiendo contener hasta 29 de 3". Se encuentra en buenas condiciones.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 18.** Clorador del tratamiento terciario.

Aspecto evaluado	Clorador
<p><b>Figura 49.</b> Clorador de la PTAR.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	<p><b>Figura 50.</b> Válvula de agua potable.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>
Descripción	
<p><b>1.</b> Clorador.  <b>2.</b> Entrada de agua potable al clorador.  <b>3.</b> Toma externa de agua potable.</p>	<p><b>4.</b> Salida de solución de cloro del clorador.  <b>5.</b> Válvula alimentadora de agua potable.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 4.1.3. Desinfectante

**Tabla 19.** Evaluación preliminar del desinfectante del tratamiento terciario.

Aspecto evaluado
Desinfectante
Evaluación preliminar
<p>El tratamiento terciario utiliza pastillas de <i>Duraclor</i><sup>®</sup> como desinfectante de las cuales diariamente se consumen dos, dosificándose el cloro libre en 15 ppm. El Departamento de Mantenimiento adquiere el <i>Duraclor</i><sup>®</sup> en bidones de 125 tabletas a un costo de Q1460.00 por bidón. Según el proveedor, éste es un producto a base de cloro concentrado y de lenta disolución que elimina bacterias y contaminantes orgánicos presentes en el agua. Cada pastilla de <i>Duraclor</i><sup>®</sup> pesa 200 g, tiene 3” de diámetro y está compuesta de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 99% tricloro. (ácido tricloroisocianúrico, TCCA). Del cual aproximadamente un 90% es cloro libre.</li> <li>b) 1% material inerte.</li> </ul> <p>Según el proveedor, el pH del agua a tratar con pastillas de <i>Duraclor</i><sup>®</sup> debe encontrarse en un valor cercano a 7.2 para una desinfección adecuada.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 20.** Desinfectante utilizado en el tratamiento terciario de la PTAR.

Aspecto evaluado	Desinfectante
<p><b>Figura 51.</b> Pastilla de <i>Duraclor</i><sup>®</sup>.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>	<p><b>Figura 52.</b> Etiqueta del bidón de <i>Duraclor</i><sup>®</sup>.</p>  <p>Fuente: Elaboración propia, 2017.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

#### 4.1.4. Mantenimiento

**Tabla 21.** Evaluación preliminar del mantenimiento del tratamiento terciario.

<b>Aspecto evaluado</b>
Mantenimiento
<b>Evaluación preliminar</b>
<p>Algunos aspectos determinados respecto a las tareas de mantenimiento en el tratamiento terciario son:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a) Diariamente se colocan dos pastillas de tricloro en el interior del clorador.</li><li>b) No se realizan muestreos individuales en el interior del clorador para determinar la dosis de cloro real adicionada al agua residual.</li><li>c) El Departamento de Mantenimiento solicita realizar mensualmente con el laboratorio ConCalidad el análisis de coliformes fecales, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos y temperatura en la descarga hacia el río. Anualmente se realiza de la misma forma un análisis completo que, además de los parámetros mencionados, involucra metales presentes, nitrógeno total y fósforo total.</li><li>d) No se cuenta con un inventario de la cantidad de pastillas disponibles en la bodega de la PTAR causando que al agotarse el contenido de los bidones, el tratamiento terciario se lleve a cabo con una cantidad no adecuada de tabletas mientras se realiza la compra de más desinfectante.</li></ul>

Fuente: Elaboración propia, 2017.

## 4.2. PARÁMETROS DE CONTROL

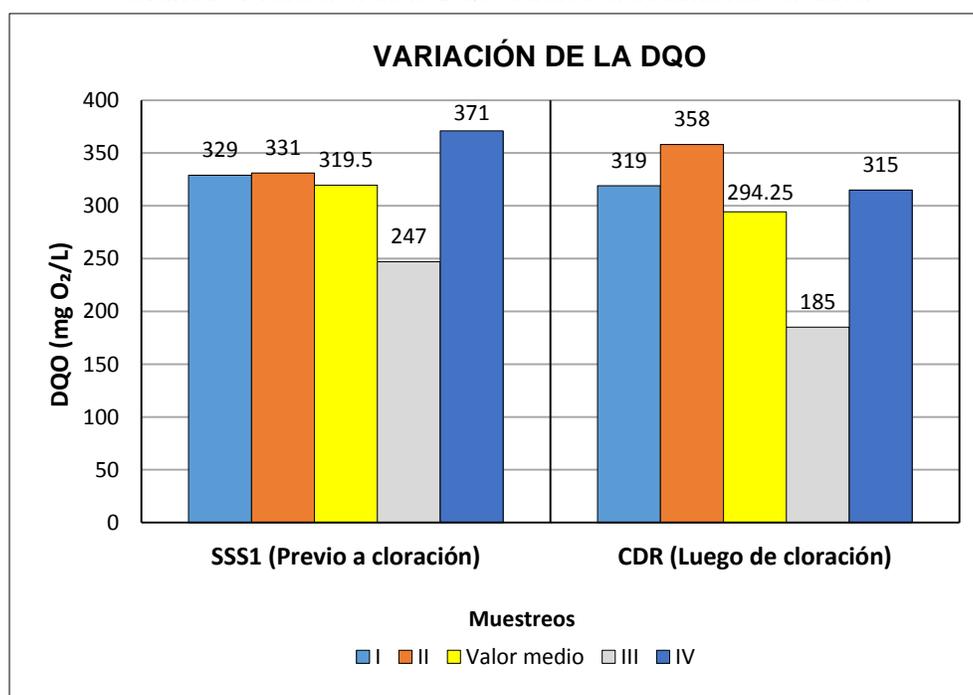
### 4.2.1. DQO

Tabla 22. DQO obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR.

Muestreo	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	
	SSS1	CDR
I	329.0	319.0
II	331.0	358.0
III	247.0	185.0
IV	371.0	315.0
$\bar{X} =$	319.50	294.25

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 5. Variación de la DQO durante el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

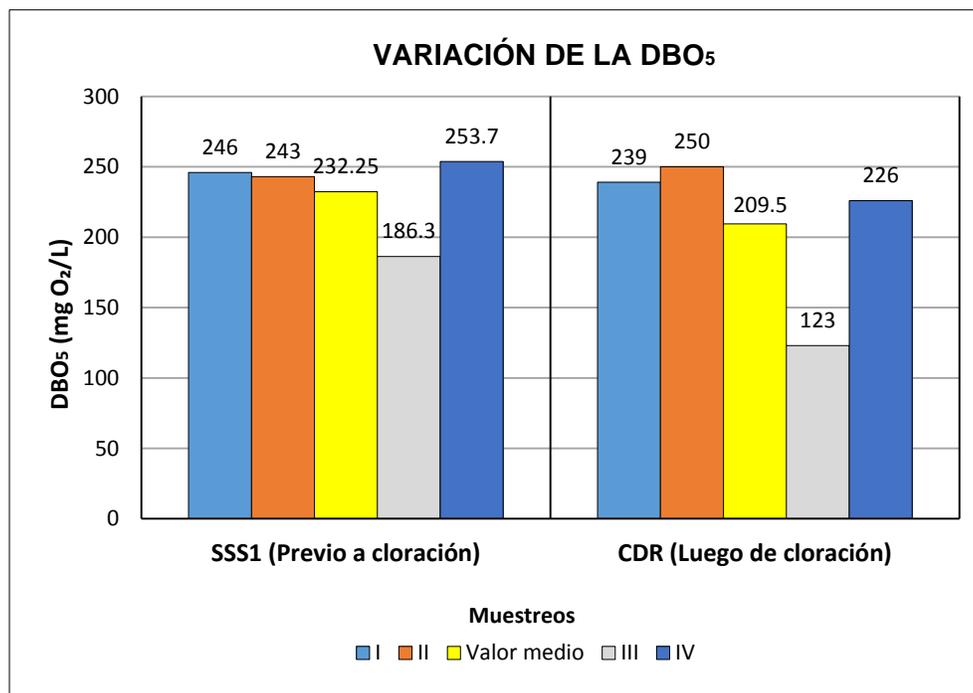
#### 4.2.2. DBO<sub>5</sub>

**Tabla 23.** DBO<sub>5</sub> obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR.

Muestreo	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	
	SSS1	CDR
I	246.0	239.0
II	243.0	250.0
III	186.3	123.0
IV	253.7	226.0
$\bar{X} =$	232.25	209.50

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 6.** Variación de la DBO<sub>5</sub> durante el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

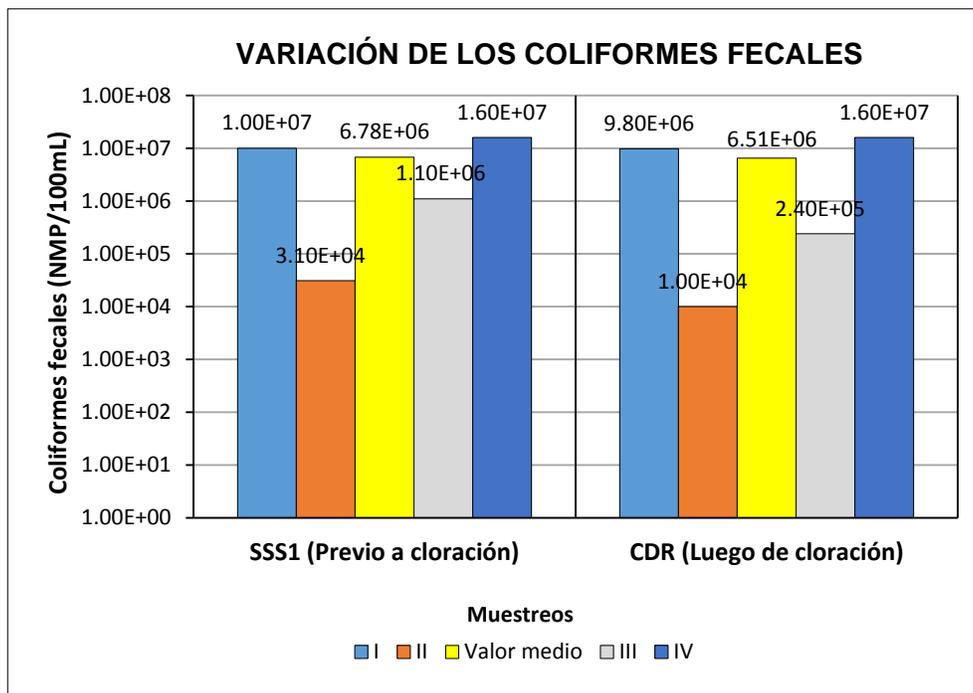
### 4.2.3. Coliformes fecales

Tabla 24. Concentración de coliformes fecales obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR.

Muestreo	Coliformes fecales (NMP/100mL)	
	SSS1	CDR
I	$1.0 \times 10^7$	$9.8 \times 10^6$
II	$3.1 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$
III	$1.1 \times 10^6$	$2.4 \times 10^5$
IV	$1.6 \times 10^7$	$1.6 \times 10^7$
$\bar{X} =$	$6.78 \times 10^6$	$6.51 \times 10^6$

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 7. Variación de los coliformes fecales durante el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

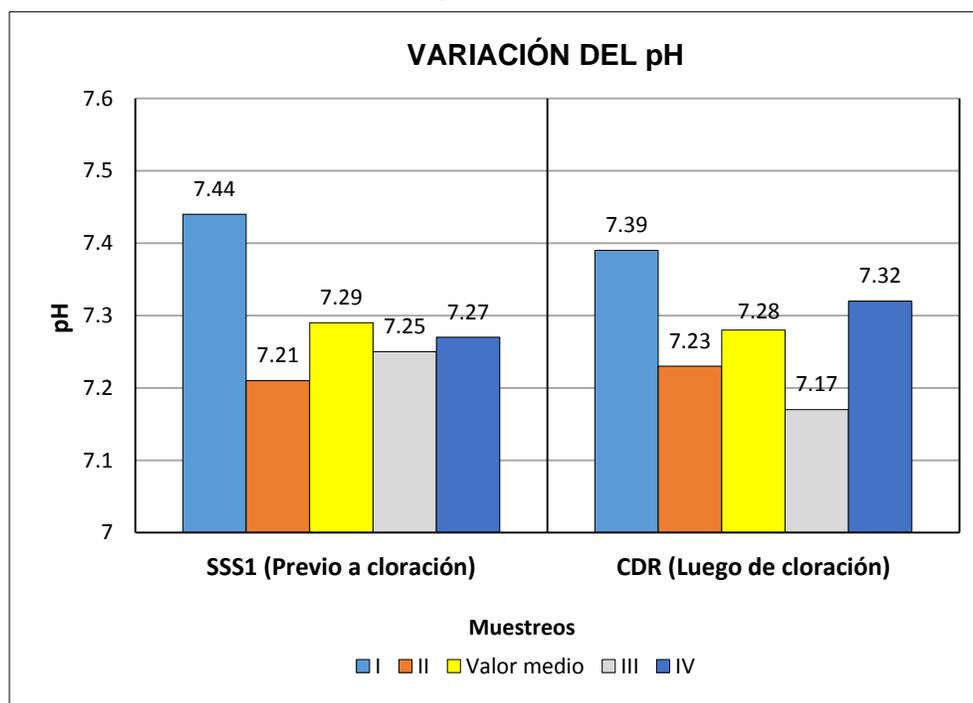
#### 4.2.4. pH

**Tabla 25.** pH obtenido en el agua residual de SSS1 y CDR.

Muestreo	pH	
	SSS1	CDR
I	7.44	7.39
II	7.21	7.23
III	7.25	7.17
IV	7.27	7.32
$\bar{X} =$	7.29	7.28

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 8.** Variación del pH durante el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

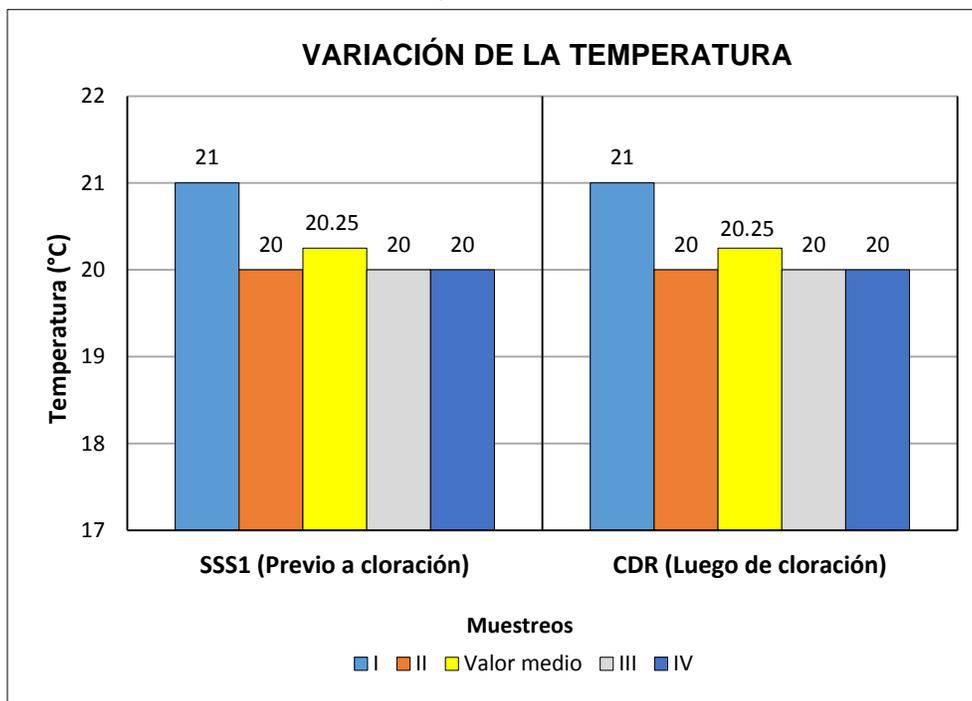
## 4.2.5. Temperatura

**Tabla 26.** Temperatura obtenida en el agua residual de SSS1 y CDR.

Muestreo	Temperatura (°C)	
	SSS1	CDR
I	21	21
II	20	20
III	20	20
IV	20	20
$\bar{X} =$	20.25	20.25

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 9.** Variación de la temperatura durante el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

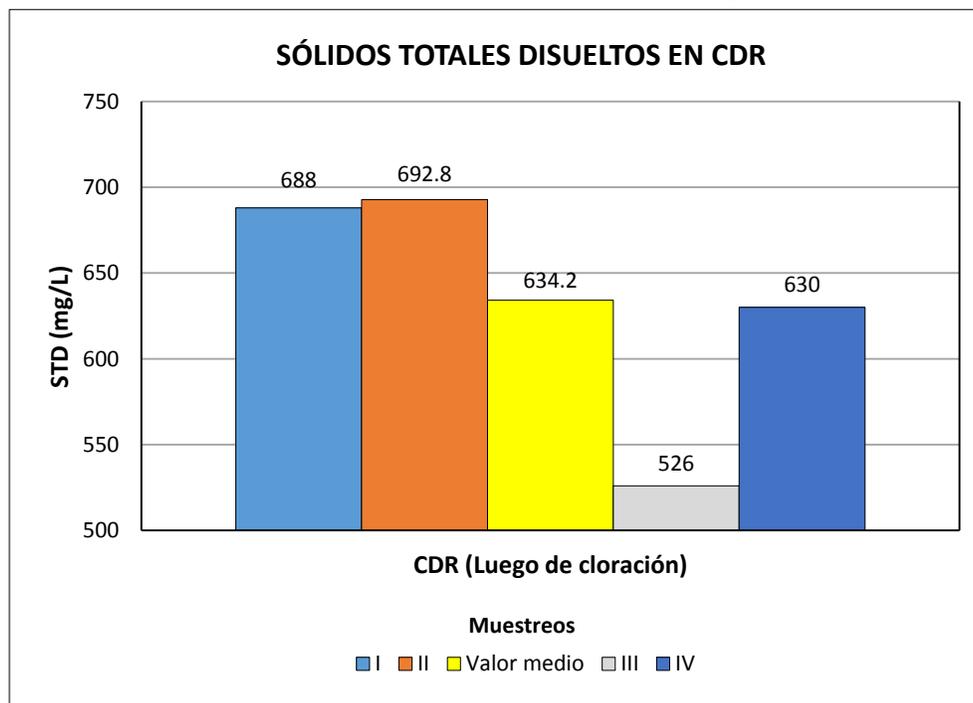
#### 4.2.6. Sólidos totales disueltos

Tabla 27. Concentración de STD obtenida en el agua residual de CDR.

Sólidos totales disueltos (mg/L)	
Muestreo	CDR
I	688.0
II	692.8
III	526.0
IV	630.0
$\bar{X} =$	634.2

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 10. Sólidos totales disueltos en CDR.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

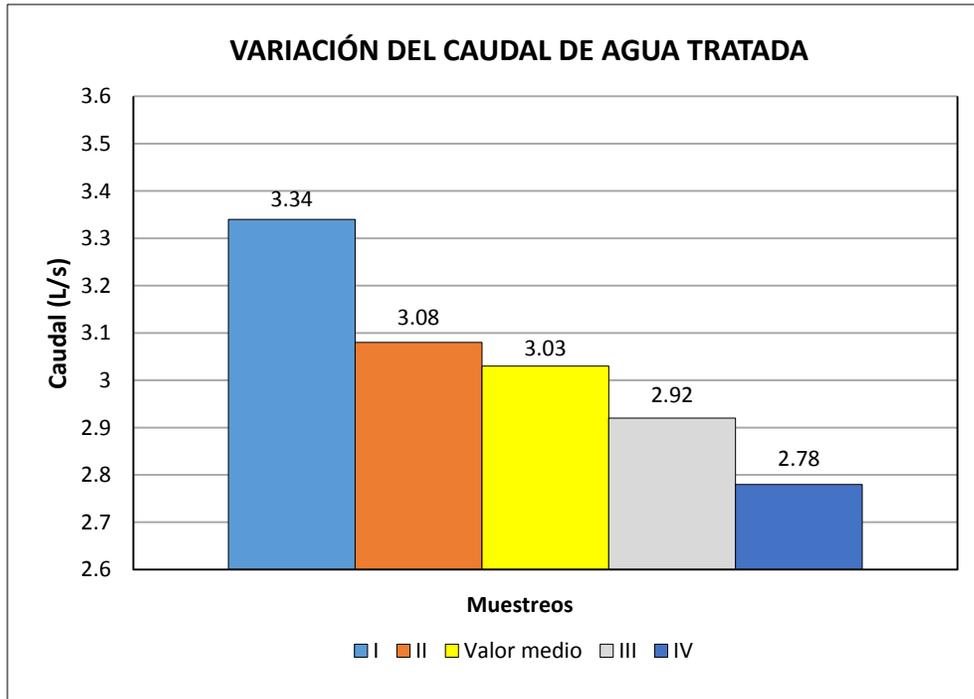
#### 4.2.7. Caudal de agua tratada en tratamiento terciario

Tabla 28. Caudal de agua tratada en el tratamiento terciario.

Muestreo	Caudal (L/s)
I	3.34
II	3.08
III	2.92
IV	2.78
$\bar{X} =$	3.03

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 11. Variación en el caudal de agua tratada en el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

#### 4.2.8. Concentración de cloro libre en solución generada en el clorador

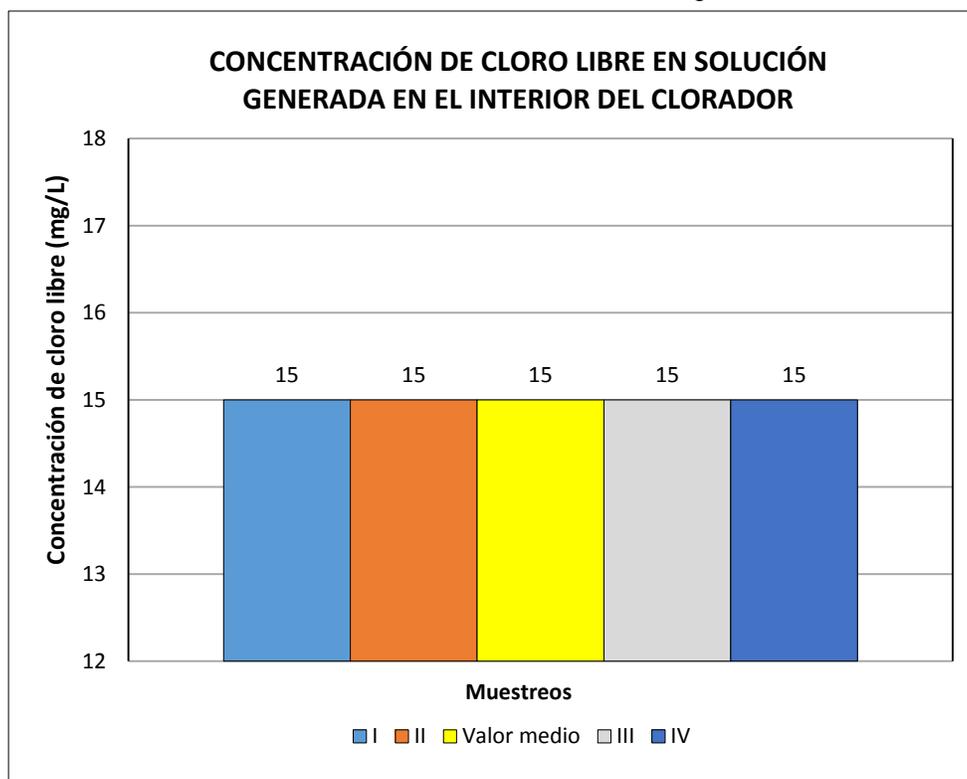
Se determinó que la concentración de cloro libre en la solución generada en el interior del clorador se mantuvo constante durante la realización de todos los muestreos del estudio.

**Tabla 29.** Concentración de cloro libre en solución generada en el clorador.

Muestreo	Concentración de cloro libre (mg/L)
I	15
II	15
III	15
IV	15
$\bar{X} =$	15

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 12.** Concentración de cloro libre en la solución generada en clorador.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

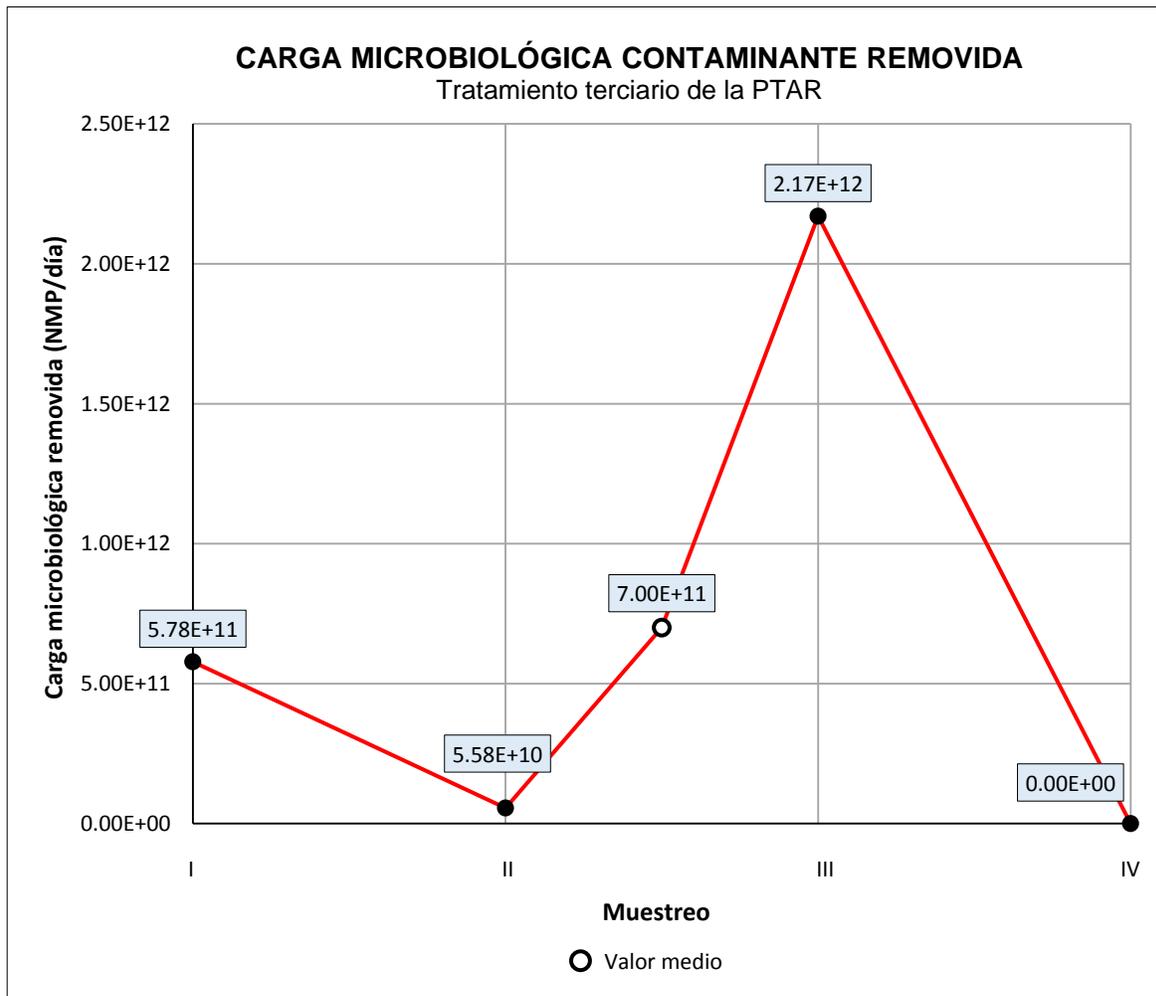
### 4.3. CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE REMOVIDA EN EL TRATAMIENTO TERCIARIO

Tabla 30. Carga microbiológica contaminante removida en el tratamiento terciario.

Muestreo	Carga microbiológica contaminante removida (NMP/día)
I	$5.78 \times 10^{11}$
II	$5.58 \times 10^{10}$
III	$2.17 \times 10^{12}$
IV	$0.00 \times 10^0$
$\bar{X} =$	$7.00 \times 10^{11}$

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 13. Carga microbiológica contaminante removida en el tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

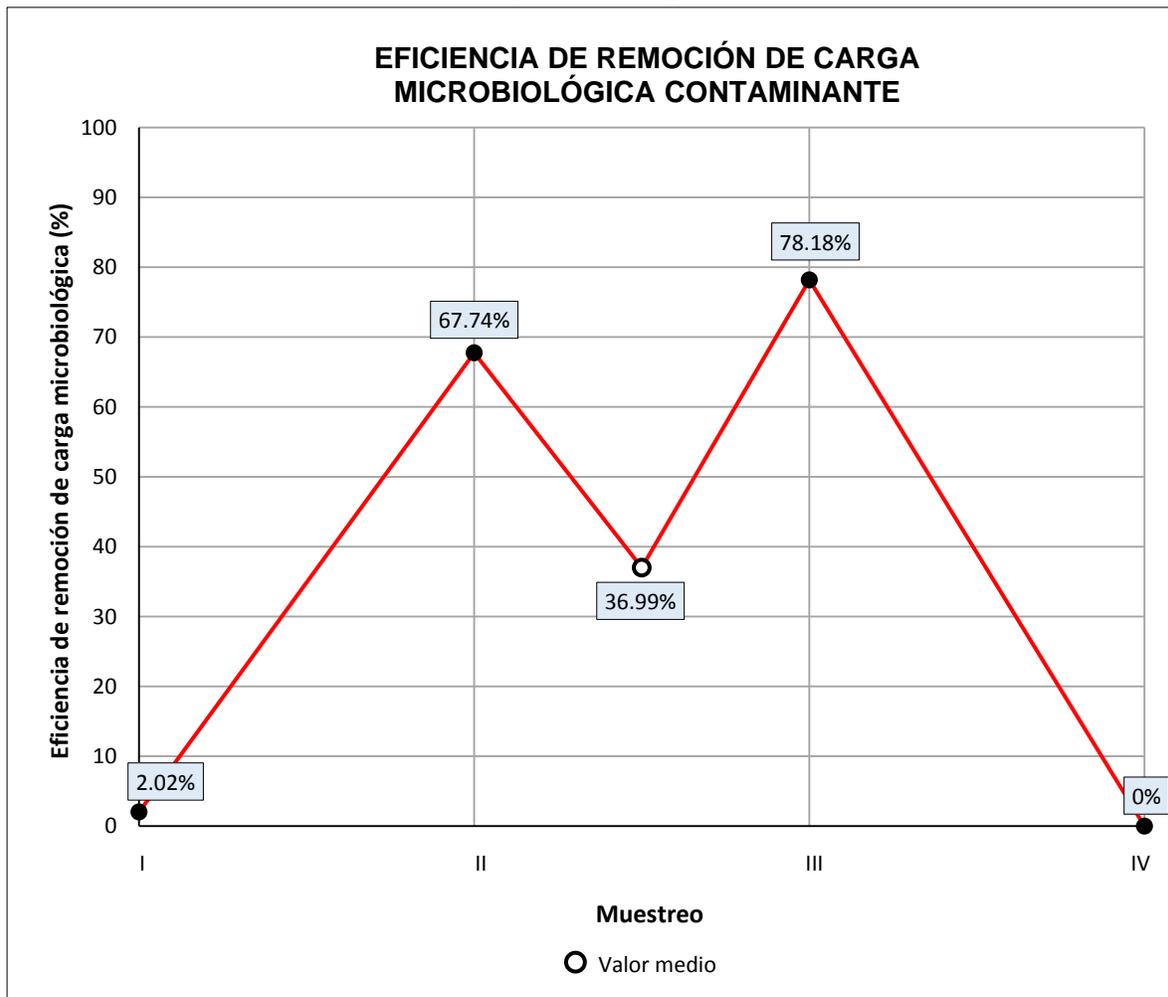
#### 4.4. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE DEL TRATAMIENTO TERCIARIO DE LA PTAR

**Tabla 31.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante del tratamiento terciario.

Muestreo	Eficiencia (%)
I	2.02
II	67.74
III	78.18
IV	0.00
$\bar{X} =$	36.99

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 14.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante del tratamiento terciario.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

#### 4.5. CUMPLIMIENTO LEGAL EN DESCARGA HACIA EL RÍO CONTRERAS

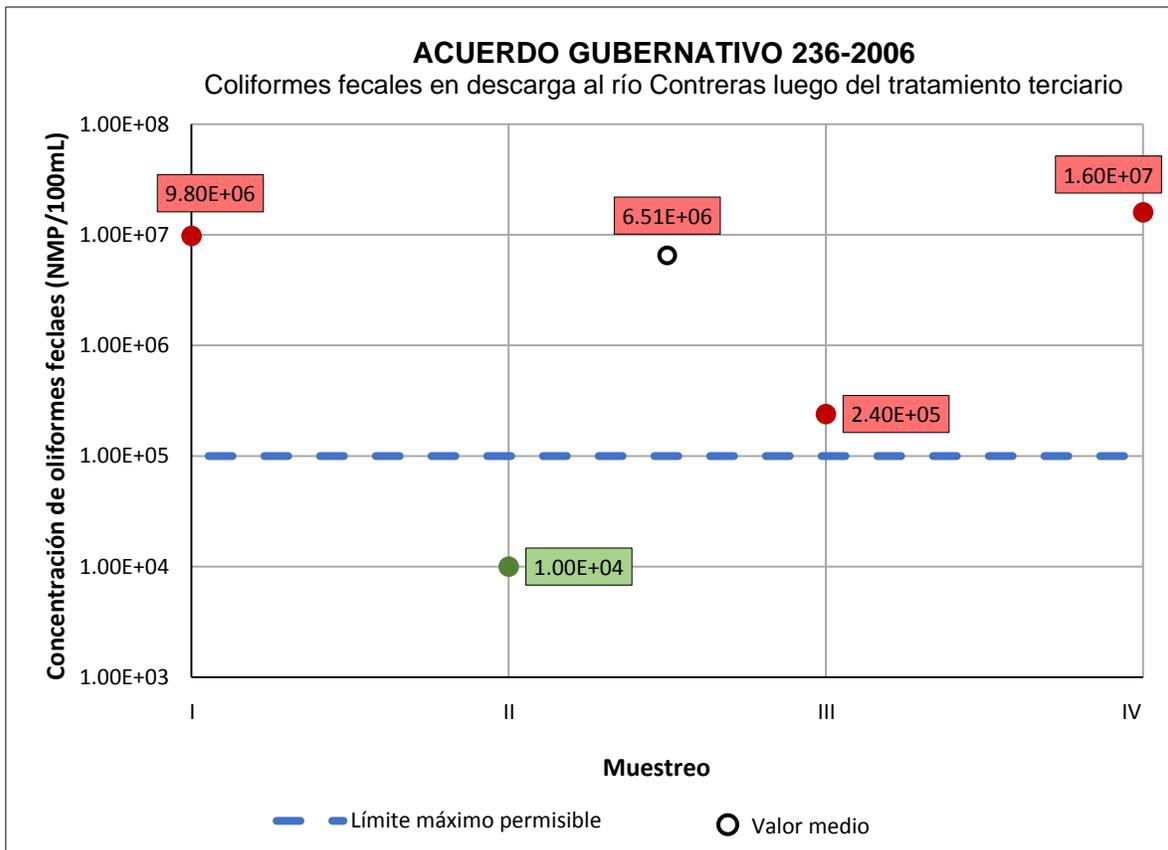
Según el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, a partir del 02/05/2015 las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores deben tener  $<1.0 \times 10^5$  NMP/100 mL de coliformes fecales.

**Tabla 32.** Cumplimiento del tratamiento terciario respecto al artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Muestreo	Concentración de coliformes fecales en CDR (NMP/100mL)	Cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006
I	$9.8 \times 10^6$	No cumple
II	$1.0 \times 10^4$	Sí cumple
III	$2.4 \times 10^5$	No cumple
IV	$1.6 \times 10^7$	No cumple
$\bar{X} =$	$6.51 \times 10^6$	No cumple

Fuente: Elaboración propia, 2017.

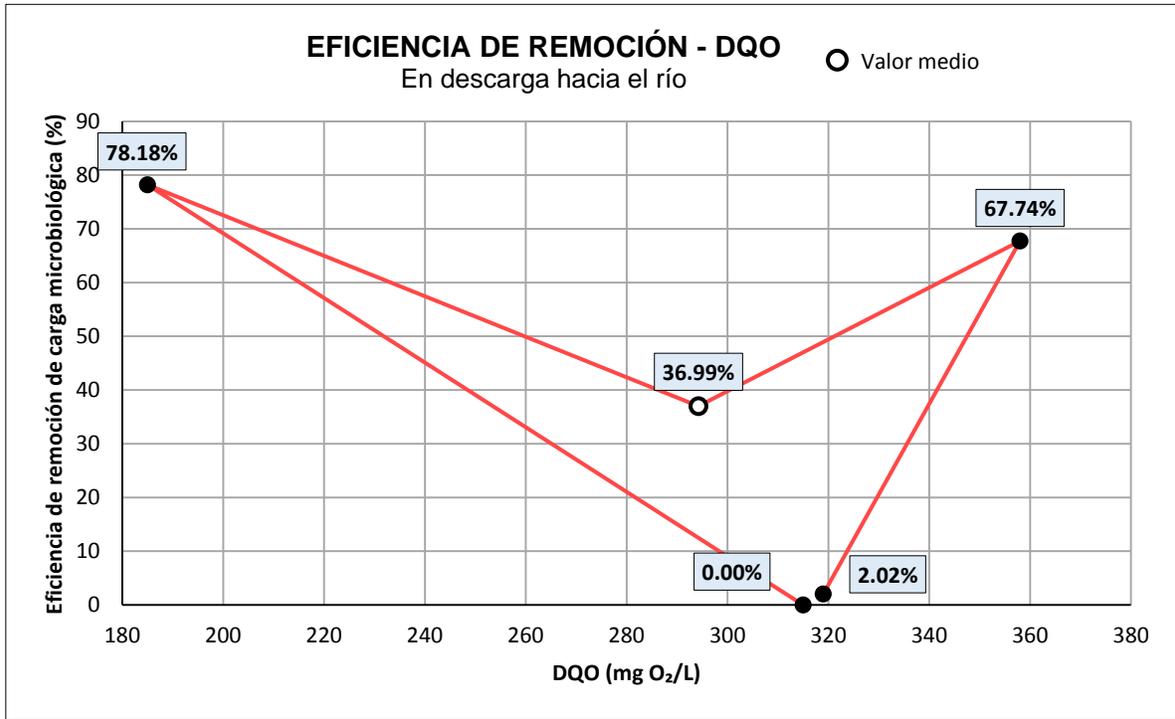
**Gráfica 15.** Cumplimiento del tratamiento terciario respecto al Acuerdo Gubernativo 236-2006.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

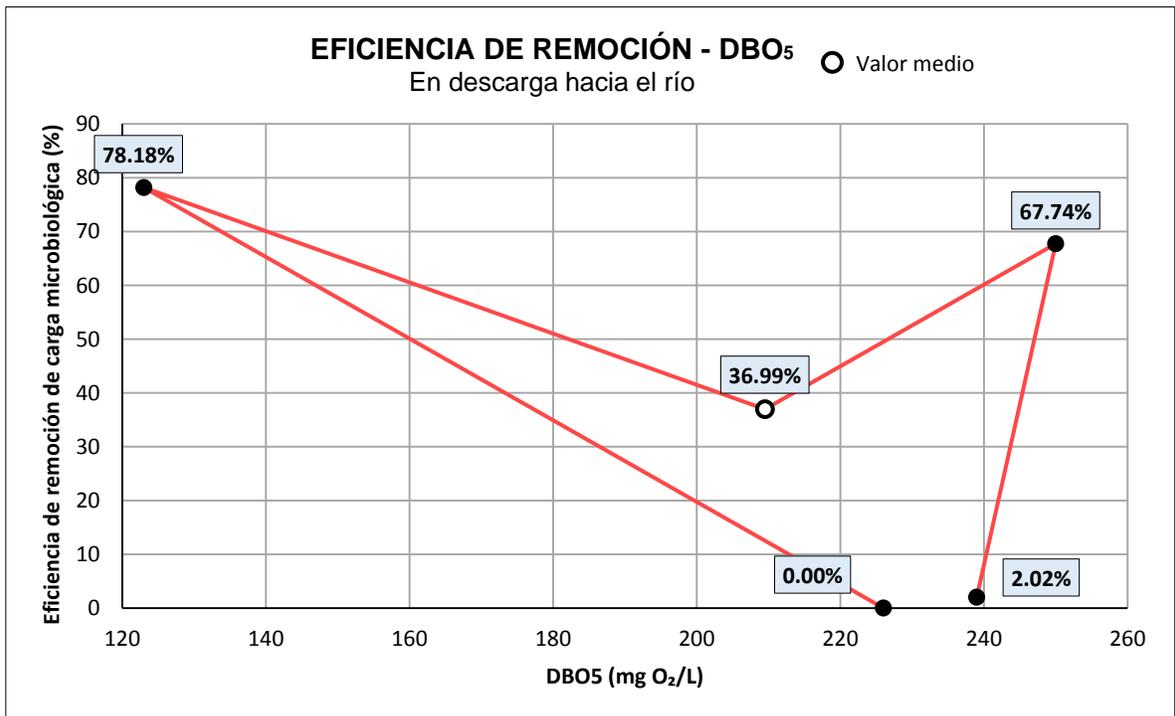
#### 4.6. RELACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA CARGA MICROBIOLÓGICA CONTAMINANTE Y PARÁMETROS DE CONTROL

Gráfica 16. Eficiencia de remoción de carga microbiológica y DQO en CDR.



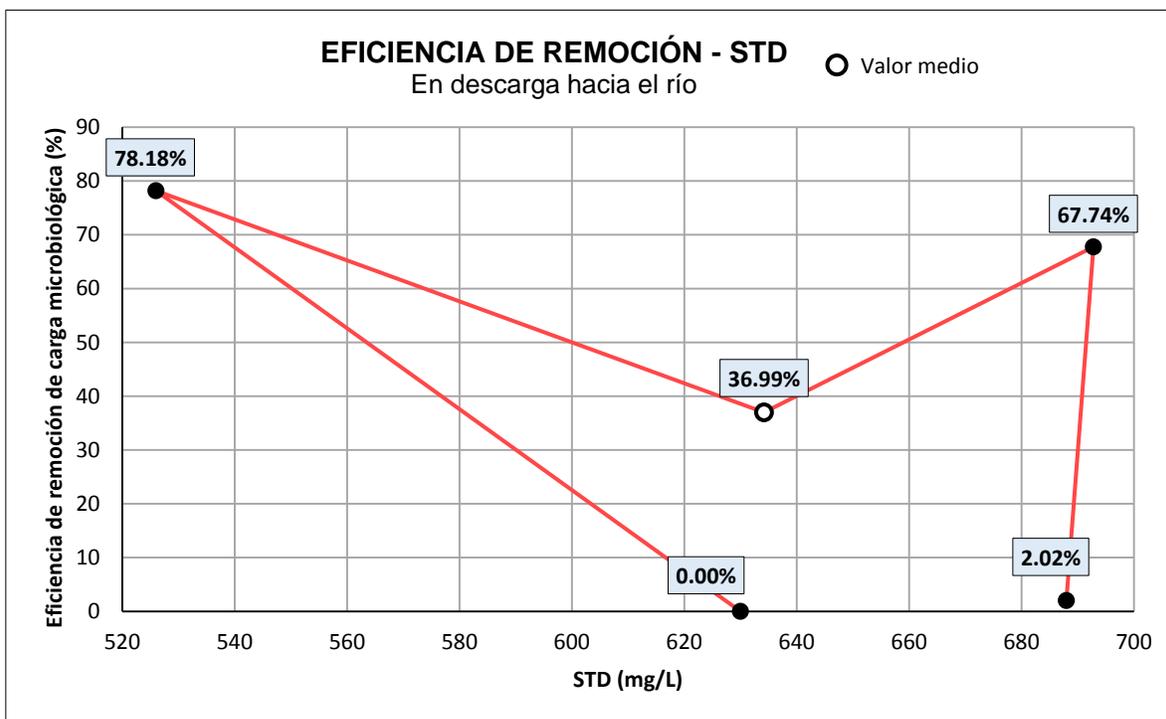
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Gráfica 17. Eficiencia de remoción de carga microbiológica y DBO<sub>5</sub> en CDR.



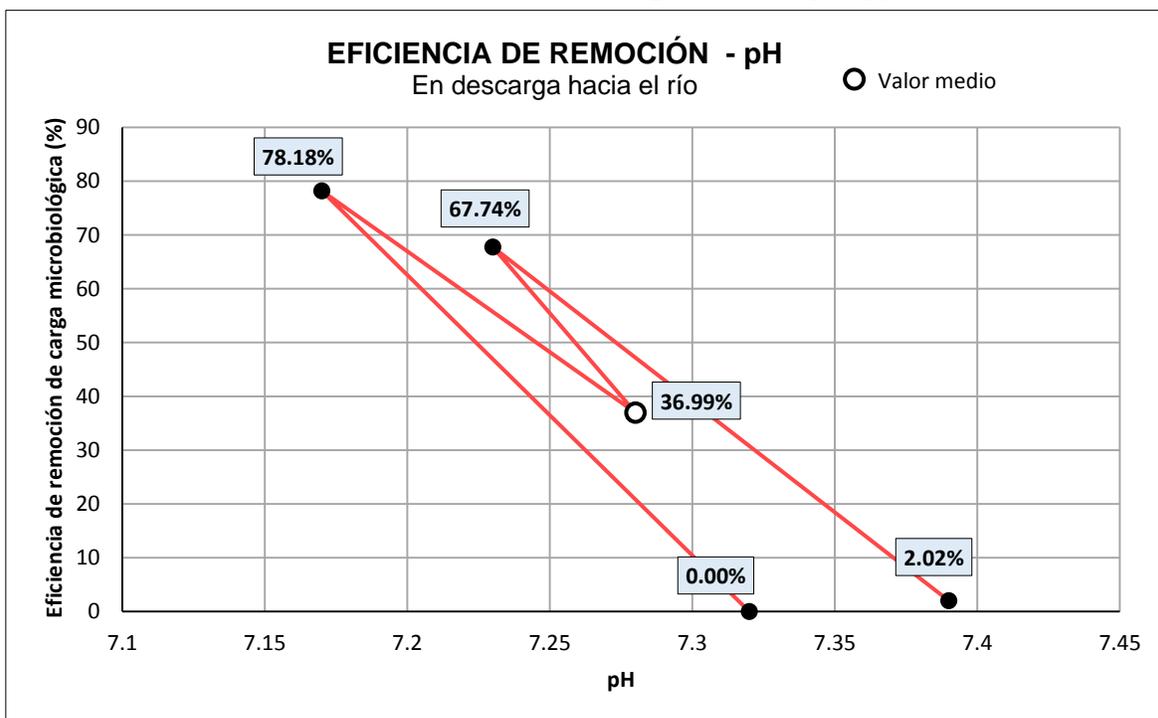
Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 18.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica y STD en CDR.



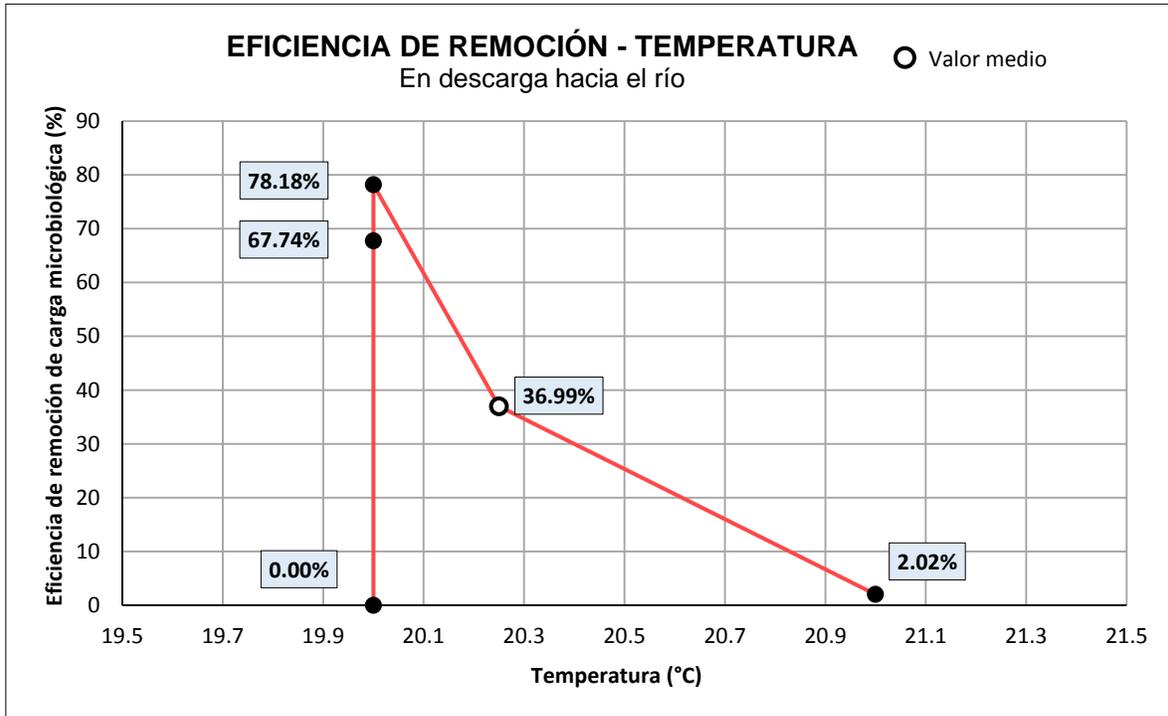
Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 19.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica y pH en CDR.



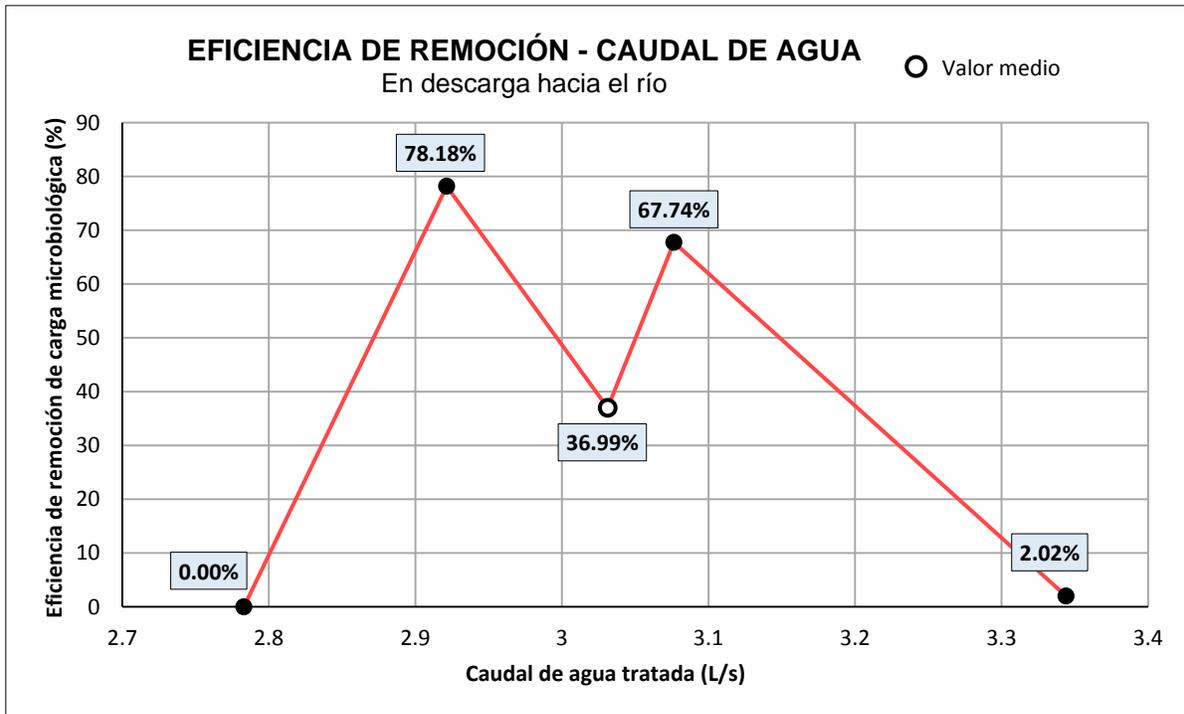
Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 20.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica y temperatura del agua en CDR.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Gráfica 21.** Eficiencia de remoción de carga microbiológica y caudal del agua en CDR.



Fuente: Elaboración propia, 2017.

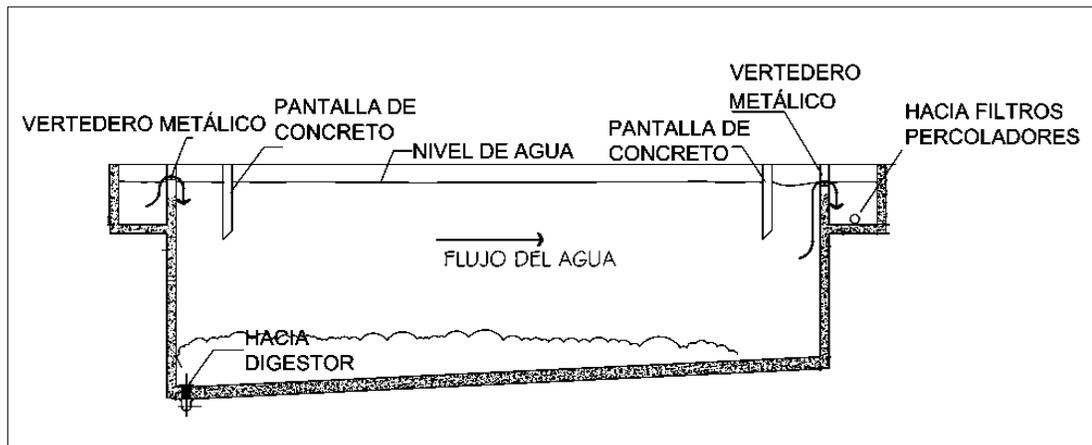
#### 4.7. PROPUESTA DE MEJORA A LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO TERCIARIO ACTUAL DE LA PTAR

1. Analizar la eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual en los tratamientos primario y secundario para determinar si con ello se puede mejorar la eficiencia del tratamiento terciario. Se propone incrementar la eficiencia de ambos tratamientos de la siguiente forma:

##### Tratamiento primario:

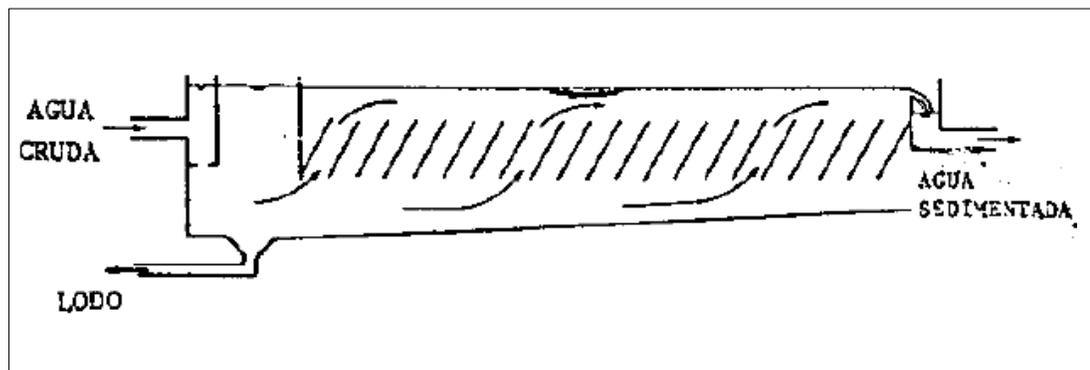
- a) Ajustar el tipo de los sedimentadores primarios actuales a uno de placas inclinadas o múltiples para incrementar el área de superficie efectiva de los mismos, combinado con un flujo ascendente de agua.

**Figura 53.** Sedimentador primario actual de la PTAR de la Universidad Rafael Landívar.



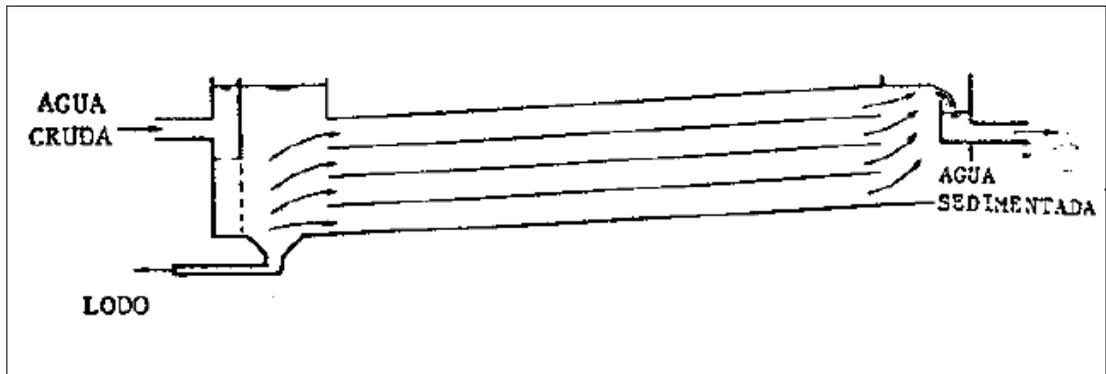
Fuente: Recinos, C. y Barrios, M. 2010. (Modificado).

**Figura 54.** Sedimentador de placas inclinadas.



Fuente: Camp, T. 1946.

**Figura 55.** Sedimentador de placas múltiples.



Fuente: Camp, T. 1946.

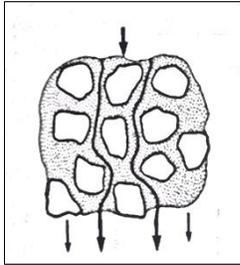
### **Tratamiento secundario:**

a) Incrementar el área de humectación de los filtros percoladores en el momento de la dispersión del agua residual, ya que según De León (2017), solamente el 32.78% del área de la superficie de los filtros percoladores es aprovechada. Para ello se propone lo siguiente:

- Distribuir simétricamente los ramales que dispersan el agua residual sobre el filtro percolador.
- Revisar periódicamente los ramales distribuidores de agua residual para eliminar taponamientos en los agujeros.
- Ajustar los ramales distribuidores de agua residual a las características de diseño originales. De León (2017), indica que actualmente cada uno de los ramales cuenta con 27 agujeros de 1/4" de diámetro cuando el diseño original de la PTAR requiere que cada uno cuente con 15 agujeros de 1/8".

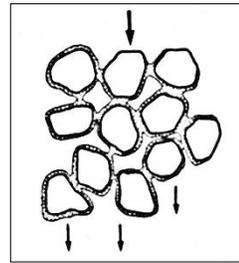
Estas mejoras evitarán que el agua residual se concentre en una única zona del medio filtrante y parte de ella pase a través del filtro sin recibir tratamiento. En cambio, se permitirá que la totalidad del agua discurra sobre las rocas filtrantes formando una capa delgada como se observa a continuación en las *Figuras 56 y 57*, que ejemplifican ambos efectos.

**Figura 56.** Efecto del aumento en la concentración de agua en una zona del medio filtrante.



Fuente: Crites, R. y Tchobanoglous, G. 1998.

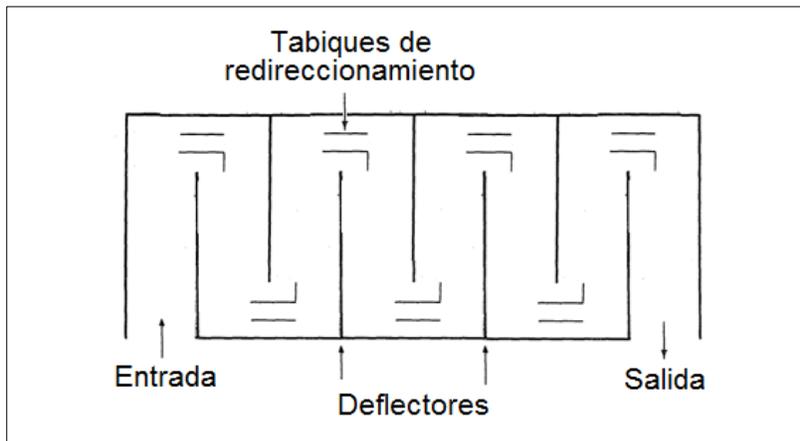
**Figura 57.** Efecto de la disminución en la concentración de agua en una zona del medio filtrante.



Fuente: Crites, R. y Tchobanoglous, G. 1998.

- b) Recircular el efluente del tratamiento secundario al filtro percolador para mejorar la calidad del agua residual obtenida.
  - c) Adaptar los sedimentadores secundarios actuales a uno de placas múltiples o placas inclinadas, como se propuso para los sedimentadores del tratamiento primario.
2. Construir un tanque de contacto de cloro con deflectores de configuración tipo serpentín previo a la descarga al río para incrementar el tiempo de contacto entre el cloro y el agua residual. El tanque debe contener tabiques de redireccionamiento del caudal para evitar cortocircuitos en el flujo de agua.

**Figura 58.** Tanque de contacto con deflectores de tipo serpentín.

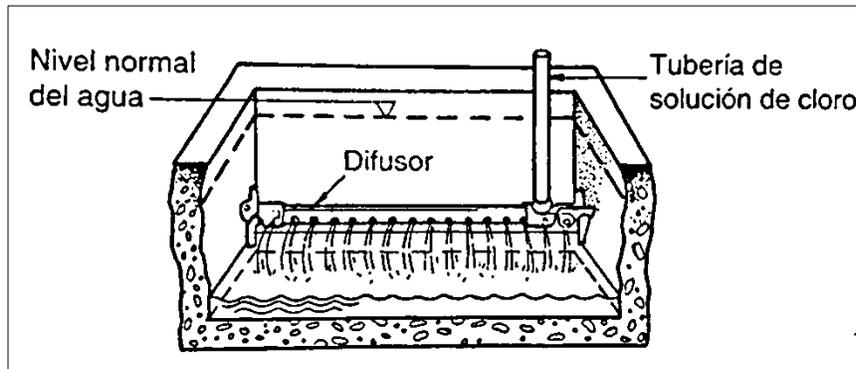


Fuente: US EPA, 1986. (Modificado).

Se recomienda construir otro tanque paralelo alternativo para no suspender operaciones mientras uno de ellos se encuentre en mantenimiento.

Por la forma del tanque de contacto propuesto, se sugiere que la solución de cloro sea adicionada en la entrada a éste mediante un difusor para canal abierto de tubería perforada ubicado bajo el nivel normal del agua como se puede observar en la *Figura 59* lo cual aseguraría una mezcla homogénea con el agua a desinfectar en el tratamiento terciario.

**Figura 59.** Difusor para canal abierto de tubería perforada.



Fuente: Romero, J. 1999.

3. Colocar una caja para toma de muestras de agua residual inmediatamente antes que esta sea clorada para poder llevar un control periódico de la eficiencia del tratamiento terciario (ya que la tubería es cerrada en todo el trayecto previo, siendo únicamente posible tomar muestras para este fin en la salida del sedimentador secundario).
4. Analizar la demanda de cloro del agua residual tratada en el tratamiento terciario para añadir una dosis de cloro que permita tener una concentración de coliformes fecales  $<1 \times 10^5$  NMP/100 mL, que exige el Acuerdo Gubernativo 236-2006.
5. Determinar periódicamente la concentración de cloro residual en el efluente que se descarga al río Contreras así como el cloro libre generado en el interior del clorador para llevar un control real de la cantidad de cloro que se utiliza para tratar el agua residual en el tratamiento terciario.

6. Reemplazar el desinfectante actual (tricloro sólido) utilizado en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central por dióxido de cloro debido a que posee una eficiencia bactericida alta y no reacciona con materia orgánica suspendida en el agua, evitando la formación de trihalometanos.
  
7. Establecer un programa de mantenimiento preventivo a nivel general en la PTAR, debiendo considerar las siguientes acciones:
  - a) Fijar un plan de revisión y mantenimiento constante de todas las unidades de tratamiento de la PTAR para asegurar su correcto funcionamiento, el cual incluya:
    - Limpieza de los sedimentadores y del tanque de contacto de cloro para eliminar sedimentos.
    - Estabilización y cuidado de la biopelícula de los filtros percoladores.
  - b) Revisión y limpieza periódica de todas las válvulas y tuberías de la PTAR para evitar taponamientos y corregir fugas.
  - c) Capacitación constante de los operarios de la PTAR.

#### 4.8. RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

**Tabla 33.** Resumen de los parámetros obtenidos en SSS1.

PARÁMETROS OBTENIDOS EN SSS1					
Eficiencia de remoción de carga microbiológica (%)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	pH	Temperatura (°C)
2.02	329.0	246.0	1.0x10 <sup>7</sup>	7.44	21
67.74	331.0	243.0	3.1x10 <sup>4</sup>	7.21	20
78.18	247.0	186.3	1.1x10 <sup>6</sup>	7.25	20
0.00	371.0	253.7	1.6x10 <sup>7</sup>	7.27	20
36.99	319.50	232.5	6.78x10 <sup>6</sup>	7.29	20.25

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 34.** Resumen de los parámetros obtenidos en CDR.

PARÁMETROS OBTENIDOS EN CDR						
Eficiencia de remoción de carga microbiológica (%)	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)	pH	STD (mg/L)	Temperatura (°C)
2.02	319.0	239.0	9.8x10 <sup>6</sup>	7.39	688.0	21
67.74	358.0	250.0	1.0x10 <sup>4</sup>	7.23	692.8	20
78.18	185.0	123.0	2.4x10 <sup>5</sup>	7.17	526.0	20
0.00	315.0	226.0	1.6x10 <sup>7</sup>	7.32	630.0	20
36.99	294.25	209.50	6.51x10 <sup>6</sup>	7.28	634.2	20.25

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Tabla 35.** Resumen de los resultados obtenidos del tratamiento terciario de la PTAR.

Eficiencia de remoción de carga microbiológica (%)	Concentración de cloro libre adicionada (mg/L)	Carga microbiológica contaminante removida (NMP/día)	Caudal de agua tratada (L/s)	Cumplimiento de la Etapa II del Acuerdo Gubernativo 236-2006
2.02	15	5.78x10 <sup>11</sup>	3.34	No cumple
67.74	15	5.58x10 <sup>10</sup>	3.08	Sí cumple
78.18	15	2.17x10 <sup>12</sup>	2.92	No cumple
0.00	15	0.00x10 <sup>0</sup>	2.78	No cumple
36.99	15	7.00x10 <sup>11</sup>	3.03	No cumple

Fuente: Elaboración propia, 2017.

## **CAPÍTULO V**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar trata el agua residual generada dentro de sus instalaciones a través de tres fases distintas, siendo el tratamiento terciario el encargado de mejorar la calidad microbiológica del agua residual mediante el tratamiento químico de cloración previo a la descarga hacia el río Contreras.

La decisión para ejecutar este estudio se basó en la observación preliminar de la situación actual en la cual se encontraba el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central, ya que en ella se determinó el control mínimo que recibe a pesar de su importancia en la PTAR que contribuye a disminuir la carga microbiológica contaminante del agua residual en la descarga al río Contreras.

Para fijar las bases bajo las cuales se llevó a cabo el estudio realizado, se procedió a recolectar información básica acerca del tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central en fuentes bibliográficas y entrevistando a personas expertas que han tenido algún tipo de acercamiento directo con este tratamiento. Se determinó que la información que existe al respecto del tratamiento terciario es escasa, siendo este otro motivo para la ejecución de esta investigación.

Previo a dar inicio con los muestreos de agua residual en la PTAR, se determinó el volumen de la cubeta utilizada. Esto se efectuó con el propósito de relacionarlo con el tiempo de llenado de la misma y así poder calcular el caudal de agua tratada en el tratamiento terciario durante cada uno de los muestreos realizados (véase *Tabla 28*). El caudal del agua residual se determinó únicamente en la caja de descarga hacia el río –CDR– ubicada al final del tratamiento terciario y se trabajó bajo la premisa de que el caudal en este punto es igual al que fluye al inicio del tratamiento.

Durante el estudio se realizaron muestreos en tres puntos de la PTAR según se puede observar en la *Figura 41*: en el clorador para obtener muestras de la solución de cloro y determinar la concentración de cloro libre (15 mg/L, *Tabla 29*) con la que se lleva a cabo el tratamiento terciario, en la salida del sedimentador secundario 1 –SSS1– para captar agua residual previo a su ingreso al tratamiento terciario y en la caja de descarga hacia el río –CDR– ubicada después de la unidad de cloración de la PTAR para obtener agua residual ya tratada previo a que sea descargada al río Contreras.

No fue posible tomar muestras de agua inmediatamente antes de su cloración ya que todo el flujo se encuentra confinado en una tubería cerrada en la que no existe toma alguna para la captación de muestras, por lo que se decidió muestrear en SSS1, el cual es el punto abierto más cercano previo al clorador.

Se realizó el muestreo en la estación seca, dado que hay factores que alteran los resultados durante la estación lluviosa y se calculó tomar cuatro muestras, tanto en SSS1 como en CDR, en base a lo determinado con el método estadístico propuesto por *Apha et al, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21 ed., 2005* (Ver sección 3.4.2. *Número de muestras*) para obtener resultados con un 90% de nivel de confianza. Para la captación de las muestras en ambos puntos mencionados se utilizó en todo momento equipo de protección personal (véase *Tabla 11*) debido al riesgo que implica para la salud el hecho de tener contacto directo con aguas residuales.

Por lineamientos del LAFYM (laboratorio en el cual se efectuaron los análisis del agua residual), se utilizaron dos recipientes plásticos por punto para almacenar las muestras captadas: uno de 1.5 L para el agua a la que se le realizarían análisis fisicoquímicos (DQO, DBO<sub>5</sub>, STD), y uno de 600 mL para aquella a la que se le realizaría el análisis microbiológico (coliformes fecales). Se captó un mayor volumen de agua para análisis fisicoquímicos debido a la cantidad de parámetros a determinar en ella.

Para asegurar un manejo adecuado de las muestras de agua residual captadas, los recipientes fueron debidamente identificados y transportados al laboratorio a aproximadamente 4 °C, ya que a esta temperatura la mayoría de los microorganismos no pueden reproducir evitando la alteración de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Además de la captación de agua residual en SSS1 y en CDR, en cada muestreo se analizó la solución de cloro generada en el interior del clorador, determinándose que la cloración del agua residual en el tratamiento terciario se lleva a cabo agregando en todo momento una solución de cloro en una concentración de 15 mg/L al caudal de agua a tratar, como se observa en la *Tabla 29*. Por este motivo, los resultados obtenidos no se vieron afectados por variaciones en la concentración de la solución de cloro libre generada en el clorador a partir de la reacción entre agua potable y tricloro sólido –TCCA–, descrita en la *Figura 14*.

La desinfección en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central se realiza por la acción del cloro libre, ya que las pastillas de TCCA que se utilizan, cuyas características se describen en la *Tabla 19*, se disocian con el agua que ingresa al clorador formando ácido hipocloroso HClO siendo éste el agente químico de mayor efectividad bactericida derivado del cloro. Por ello, la cloración del agua tratada se realiza con un desinfectante capaz de disminuir de forma efectiva la carga microbiológica contaminante causada por los coliformes fecales presentes en el agua residual tratada.

Durante el estudio se estableció que la eficiencia media de remoción de carga microbiológica contaminante que presenta el tratamiento terciario es del 36.99% (véase *Tabla 31*). Para el cálculo de dicha eficiencia, se determinaron cinco parámetros fisicoquímicos distintos (DQO, DBO<sub>5</sub>, pH, STD y temperatura), aunque no permiten comprender a fondo la forma en la que la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante del tratamiento terciario varía a medida que estos parámetros también lo hacen.

Estos parámetros se seleccionaron como puntos de control, ya que según la teoría pueden afectar de una u otra forma la cloración del agua. Al analizar las variaciones en la DQO y DBO<sub>5</sub> es posible suponer que existe cierta cantidad de materia orgánica e inorgánica oxidable presente en el agua que interacciona con el cloro causando cambios en la eficiencia de remoción de microorganismos. De la misma forma, variaciones en el pH y los STD brindan una idea de cómo ellos inciden en la remoción de la carga microbiológica.

La desinfección del tratamiento terciario de la PTAR ocurre también por la presencia de iones de hipoclorito ClO<sup>-</sup>, producto de la disociación del HClO, el cual según Romero (1996) es de 80 a 100 veces menos eficaz que el HClO para eliminar coliformes fecales. La desinfección con ClO<sup>-</sup> ocurre en menor medida ya que su concentración disminuye a valores de pH ≤ 7.7 en agua, y como se aprecia en los resultados obtenidos en la *Tabla 25*, este valor no superó los 7.39 (muestreo I) en el agua proveniente del tratamiento terciario captada en CDR.

Según los resultados de la *Gráfica 19*, la máxima eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante (78.18%) se obtuvo en el muestreo III, para el cual el pH del agua tratada en la descarga hacia el río fue de 7.17. Este incremento en la eficiencia se ve favorecido por el pH del agua así como por otros factores que se ampliarán más adelante. Cabe destacar que a medida que el pH desciende hacia valores inferiores a 7.7, la disociación del HClO se inhibe, causando que la desinfección se lleve a cabo con esta sustancia y no con ClO<sup>-</sup>.

Se determinó una disminución en la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante en aquellos muestreos que registraron un pH más cercano a 7.7, comportamiento observado en la *Gráfica 19*, lo cual se debe a que en este punto la concentración de HClO y ClO<sup>-</sup> es aproximadamente igual existiendo una menor cantidad de HClO disponible para eliminar la carga microbiológica contaminante a diferencia de lo que ocurre cuando el pH tiene un valor inferior.

Como se observa en las *Gráficas 16 y 17*, la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante también se encuentra ligada a los parámetros de DQO y DBO<sub>5</sub>, ya que la mayor eficiencia registrada (78.18%) se encuentra asociada a los valores más bajos de DQO (247.0 mg O<sub>2</sub>/L) y DBO<sub>5</sub> (186.3 mg O<sub>2</sub>/L) obtenidos durante el estudio en el agua residual previo a ser clorada.

Una DBO<sub>5</sub> alta se encuentra relacionada con una eficiencia baja de remoción de carga microbiológica contaminante debido a que eso significa que existe una mayor cantidad de materia orgánica suspendida en el agua que es susceptible a interactuar con el cloro libre, esto disminuye su concentración y por ende, la cantidad de microorganismos que se pueden eliminar.

En la medición obtenida en el muestreo IV se observa que la eficiencia fue del 0.00% y el valor de la DBO<sub>5</sub> del agua residual previo a su cloración (253.7 mg O<sub>2</sub>/L) fue mayor a la obtenida durante el muestreo III (186.3 mg O<sub>2</sub>/L, el cual presentó la eficiencia más alta registrada en el estudio). (Véase *Gráfica 6*).

El mismo comportamiento es observado con la DQO del agua previo a ser clorada, ya que como se observa en la *Gráfica 5*, durante el muestreo con la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante más baja obtenida (0.00% en muestreo IV) se obtuvo la mayor DQO de todos los análisis (371.0 mg O<sub>2</sub>/L). Éste valor de DQO es más alta que la registrada con la eficiencia del 78.18%, en donde el valor fue de 247.0 mg O<sub>2</sub>/L.

A pesar de lo anteriormente expuesto y por tratarse de mediciones puntuales, al relacionar la eficiencia media de remoción de carga microbiológica contaminante (36.99%, *Tabla 31*) con los valores medios obtenidos de DBO<sub>5</sub> (232.25 mg O<sub>2</sub>/L, *Tabla 23*) y DQO (319.50 mg O<sub>2</sub>/L, *Tabla 22*) en el agua previo a ser clorada, no puede decirse que la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante se incrementa a medida que estos dos parámetros disminuyen ya que no existe una relación estadísticamente comprobable entre ambos.

De acuerdo a la curva de demanda de cloro que presenta la teoría (véase *Gráfica 3*), esto ocurre porque el cloro libre generado en el clorador (el cual es un agente oxidante fuerte) reacciona con las sustancias inorgánicas reductoras que se encuentran presentes en el agua residual (incluidas dentro de la DQO), pudiendo provocar una disminución en la concentración de cloro libre disponible en el medio.

Esta nueva concentración de cloro libre disponible logra un nuevo decremento debido a que continua reaccionando con las sustancias orgánicas presentes en el agua residual (cuantificadas dentro de la DBO<sub>5</sub>), hasta el punto en el que el cloro libre reacciona con toda la materia orgánica con la que podía interactuar y ejerce su acción bactericida a una menor concentración de la que fue adicionado al agua residual.

Este consumo del cloro libre producto de su interacción con las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua se ve reflejado en la disminución del valor promedio de la DBO<sub>5</sub> (disminución del 7.90%) y de la DQO (disminución del 9.80%) del agua residual luego de su cloración respecto al valor obtenido, en promedio, antes de tratar el agua en el tratamiento terciario. Este comportamiento puede observarse en las *Gráficas 5 y 6*.

De forma similar a lo observado con los parámetros de DBO<sub>5</sub> y la DQO, la máxima eficiencia calculada en el estudio (78.18%, *Tabla 31*), se obtuvo con la menor concentración de sólidos disueltos totales –STD– registrados (526.0 mg/L en el muestreo III), según puede observarse en la *Gráfica 18*.

Esto se debe a que la teoría indica que la efectividad del cloro disminuye en aguas residuales turbias que contienen sólidos debido a que los microorganismos pueden cubrirse al protegerse entre las partículas presentes en el agua, evitando así el contacto directo con el cloro y sobreviviendo a su acción bactericida, aunque como ya se mencionó con otros parámetros, tampoco existe una relación estadísticamente comprobable entre los STD y la eficiencia de remoción.

Según la *Gráfica 11*, los caudales de agua determinados fluctuaron en un rango de 0.56 L/s siendo el caudal máximo de 3.34 L/s en el muestreo I y el mínimo de 2.78 L/s en el muestreo IV. Debido a esta leve variación no pudo determinarse una relación directa entre la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante y el caudal de agua tratada en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central.

Así mismo, no se encontró una relación entre las eficiencias obtenidas con la variación en la temperatura del agua residual tratada como se observa en la *Gráfica 20*, ya que según la *Tabla 26* ésta osciló antes y después de la cloración en un rango de 1 °C, siendo la máxima de 21 °C en el muestreo I y la mínima de 20 °C en el II, III y IV.

La carga microbiológica contaminante originada por la presencia de coliformes fecales está directamente relacionada con la concentración de estos microorganismos en el agua residual tratada así como con el caudal de agua que los contiene, lo cual provoca que una mayor concentración o un mayor caudal incrementen la carga microbiológica contaminante. Se determinó que durante el estudio, las variaciones significativas en la carga microbiológica removida no fueron causadas por el caudal ya que como se detalló con anterioridad, éste únicamente varió en un rango de 0.56 L/s.

Por otro lado, en la *Gráfica 13* se observa un pico de remoción máxima de carga microbiológica contaminante en el muestreo III de  $2.17 \times 10^{12}$  NMP/día de coliformes fecales el cual se asocia a la alta eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante registrada ese día (78.18%), la cual permitió reducir la concentración de coliformes fecales en la entrada al tratamiento terciario desde un valor de  $1.1 \times 10^6$  NMP/100 mL hasta un valor de salida de  $2.4 \times 10^5$  NMP/100 mL (véase *Gráfica 7*). Estos valores indican una remoción de 860,000 NMP/100 mL de coliformes fecales en el agua durante este muestreo.

A pesar de la baja eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante presentada en el muestreo I (2.02%), la carga microbiológica removida fue de  $5.78 \times 10^{11}$  NMP/día de coliformes fecales como se observa en la *Tabla 29*, un valor superior al obtenido en el muestreo II que presentó una eficiencia del 67.74% y en el que se removió una menor carga microbiológica equivalente a  $5.58 \times 10^{10}$  NMP/día de coliformes fecales (véase *Gráfica 13*).

Esto se debe a que la concentración de coliformes fecales presentes en el agua residual del muestreo I en la entrada al tratamiento terciario (véase *Tabla 24*) se redujo desde  $1.0 \times 10^7$  NMP/100 mL hasta un valor de salida de  $9.8 \times 10^6$  NMP/100 mL, lo cual representa la eliminación de 200,000 NMP/100 mL de coliformes fecales, en comparación a lo sucedido en el muestreo II, en donde la reducción ocurrió desde un valor de entrada de  $3.1 \times 10^4$  NMP/100 mL hasta uno de salida de  $1.0 \times 10^4$  NMP/100 mL, removiéndose únicamente 21,000 NMP/100 mL.

Es así como el incremento en la cantidad de coliformes fecales removidos por unidad de volumen también causó un incremento en la carga microbiológica removida durante cada uno de los muestreos.

El análisis de la carga microbiológica removida es importante para establecer la contaminación microbiológica diaria vertida (en forma de coliformes fecales) por el Campus Central al río Contreras y de esta forma poder determinar si la mayor parte de la carga microbiológica contaminante en cierto punto del río posterior a la descarga se debe a la actividad dentro del Campus Central o bien, a otros entes generadores de aguas residuales cercanos.

La investigación determinó que la PTAR del Campus Central descarga agua residual al río Contreras con una concentración promedio de coliformes fecales de  $6.51 \times 10^6$  NMP/100 mL (véase *Tabla 24*), la cual excede el límite máximo permisible establecido en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 para este parámetro microbiológico ( $1.0 \times 10^5$  NMP/100 mL).

Como se observa en la comparación presentada en la *Gráfica 15* y en la *Tabla 32*, los cuatro análisis realizados, únicamente en el muestreo II se obtuvo una concentración inferior ( $1.0 \times 10^4$  NMP/100 mL) a la establecida como límite máximo permisible del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 ( $1.0 \times 10^5$  NMP/100 mL) mientras que el muestreo I, III y IV lo excedieron.

Con esto se determina que el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central no trata adecuadamente el agua residual durante el tratamiento terciario para que en su descarga hacia el río Contreras cumpla con el requerimiento microbiológico que dicta la normativa vigente en Guatemala.

Ciertas deficiencias en el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central se encuentran asociadas a la baja eficiencia media del mismo (36.99%) y al incumplimiento de la concentración media de coliformes fecales respecto al requerimiento microbiológico mínimo legal establecido en la legislación del país.

Entre estas deficiencias se destacan el tiempo de contacto entre la solución de cloro y el agua residual, ya que como se observó en la evaluación de la infraestructura (véase sección *4.1. Situación actual del tratamiento terciario*) no existe un tanque de contacto de cloro que permita que éste entre en contacto con los microorganismos presentes en el agua residual por un mayor tiempo lo cual permita potenciar su acción bactericida.

También es evidente la falta de un mezclado uniforme inicial entre el agua residual y la solución de cloro para que el éste pueda actuar homogéneamente en todo el volumen del agua residual y pueda eliminar una mayor cantidad de microorganismos. Por otro lado, es necesario también mejorar la eficiencia de los tratamientos primario y secundario de la PTAR para que los valores de  $DBO_5$  y DQO disminuyan y de esta forma eviten disminuir la concentración de cloro libre disponible para reducir la carga microbiológica contaminante.

Es por ello que se planteó una propuesta de mejora basada en las consideraciones anteriormente mencionadas, la cual debe ser evaluada de forma técnica y económica previo a su implementación. Para ello, se propone incrementar la eficiencia del tratamiento primario de la PTAR ajustando el tipo de los sedimentadores primarios actuales a uno de placas inclinadas o múltiples para incrementar el área de superficie efectiva de los mismos ya que si ésta es grande, la carga de superficie será baja, y por lo tanto, la eficiencia de sedimentación será elevada debido a que el volumen de agua a tratar se distribuye sobre una mayor área, induciendo la sedimentación de más sólidos provenientes del mismo volumen tratado actualmente.

Las placas del sedimentador de placas inclinadas que se sugiere deben tener un ángulo de inclinación entre los 40° y 60° respecto a la horizontal para asegurar que los sólidos que se sedimenten en las placas puedan deslizarse y caer al fondo del tanque, lo cual evitaría una limpieza constante de las mismas. Para determinar el ángulo óptimo entre el rango señalado deben analizarse las características de los lodos que se manejen.

Implementando esta propuesta, el agua fluirá hacia arriba pasando por las placas inclinadas, provocando que las partículas asentables las golpeen y eventualmente resbalen debido a la inclinación, cayendo al fondo del sedimentador, cosa que no ocurre con el modelo actual de los sedimentadores de la PTAR, los cuales solamente consisten en un canal rectangular de fondo inclinado.

Con una menor cantidad de sedimentos en el agua residual tratada se evitará interferir con la acción bactericida del cloro al disminuir los resquicios en los cuales los microorganismos pueden ocultarse. De la misma forma, los sedimentos eliminados arrastrarán consigo materia orgánica, evitando que ésta llegue hasta la unidad de cloración y disminuya la concentración de cloro libre disponible para eliminar a los microorganismos. Un aumento en la eficiencia de los sedimentadores se observará en la disminución de turbidez del agua residual.

Según los resultados obtenidos en la *Gráfica 17*, un valor bajo de DBO<sub>5</sub> incrementa la eficiencia del tratamiento terciario. Para reducir este parámetro es necesario incrementar la eficiencia de los filtros percoladores de la PTAR y esto puede conseguirse al aumentar el área de humectación de los mismos, ya que en la actualidad, solamente el 32.78% de ésta es aprovechada.

Actualmente, al haber una menor área de humectación, el flujo de agua residual tiende a concentrarse en una sola zona del filtro percolador, causando que el volumen del líquido llene los intersticios del medio filtrante y permitiendo que algunas partículas atraviesen el medio sin tratamiento.

Al aumentar el área de humectación, el agua residual se dispersará sobre una mayor área en la superficie del filtro percolador y fluirá alrededor del medio filtrante formando una delgada película manteniendo los intersticios vacíos. Cuando esto ocurre, los constituyentes del agua residual aplicada que se encuentran en forma soluble y coloidal serán absorbidos, y el oxígeno del aire ubicado entre los intersticios del medio pasará a través de la película del líquido hasta las bacterias aerobias responsables de la oxidación de la materia orgánica, lográndose una reducción de la DBO mucho más efectiva.

Se recomienda también recircular el efluente del tratamiento secundario al filtro percolador ya que esto aumentaría la eficiencia en la remoción de la DBO debido a que la materia orgánica del efluente recirculado del filtro tendría contacto más de una vez con la biopelícula. Además, la recirculación del efluente permitiría el retorno de microorganismos vivos, lo cual incrementaría también la eficiencia del tratamiento actual de la PTAR.

Entre las propuestas sugeridas se menciona la construcción de dos tanques de contacto de cloro (uno para operar mientras el otro está en mantenimiento) para que el desinfectante utilizado ejerza su acción bactericida por cierto tiempo sobre el agua residual, a fin de reducir la carga microbiológica contaminante que contiene.

Un incremento en el factor de dispersión del desinfectante en el interior del tanque de contacto evita que éste se mantenga concentrado en el agua residual y por ende, decline sustancialmente la eficiencia del tanque. Es por ello que se propone la construcción de un tanque de contacto con deflectores de configuración tipo serpentín ya que este diseño reduce satisfactoriamente el factor dispersión del desinfectante por el efecto de los deflectores al proporcionar el trayecto más largo posible para que el agua residual fluya.

Se recomienda colocar tabiques de redireccionamiento del caudal dentro del tanque de contacto para evitar cortocircuitos en el flujo de agua, es decir, para evitar que el agua residual fluya a una velocidad diferente a la que se desea y finalice el recorrido del trayecto en un tiempo distinto al deseado, el cual se sugiere que sea de 15 minutos con base al caudal medio diario. Puede utilizarse un clorador parecido al actual para proveer de cloro libre en solución al tanque de contacto, el cual debería ser aplicado en el ingreso al mismo.

Debido a la forma del tanque de contacto propuesto, se sugiere que la solución de cloro sea adicionada en la entrada a éste mediante un difusor para canal abierto de tubería perforada el cual se encuentre ubicado bajo el nivel normal del agua lo cual aseguraría una mezcla homogénea con el agua residual a desinfectar en el tratamiento terciario.

En la propuesta de mejora a la eficiencia del tratamiento terciario también se sugieren otras recomendaciones importantes para brindarle un seguimiento adecuado al desempeño del tratamiento terciario, tales como la construcción de una caja de toma de muestras de agua residual inmediatamente antes de que sea clorada para determinar la eficiencia del tratamiento en un futuro, así como para analizar la demanda de cloro para añadir la cantidad necesaria de este desinfectante para cumplir con el límite máximo permisible de coliformes fecales normado por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Finalmente, se propone también reemplazar el tricloro utilizado actualmente como desinfectante por dióxido de cloro debido a que este posee una eficiencia bactericida alta y no reacciona con materia orgánica suspendida en el agua, evitando la formación de trihalometanos.

## **CAPÍTULO VI CONCLUSIONES**

1. La carga microbiológica contaminante removida promedio mediante el tratamiento terciario de la PTAR del Campus Central bajo condiciones normales de operación en estación seca es de  $7.0 \times 10^{11}$  NMP/día de coliformes fecales, mientras que la eficiencia de remoción de carga microbiológica contaminante promedio es del 36.99%.
2. La PTAR del Campus Central bajo condiciones normales de operación en estación seca descarga agua residual al río Contreras con una concentración promedio de coliformes fecales de  $6.51 \times 10^6$  NMP/100 mL, la cual excede el límite máximo permisible ( $1.0 \times 10^5$  NMP/100 mL) establecido en la etapa II del artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
3. El agua residual de la PTAR del Campus Central bajo condiciones normales de operación en estación seca ingresa al tratamiento terciario con valores medios de DBO<sub>5</sub>, DQO, pH y temperatura de 232.25 mg O<sub>2</sub>/L, 319.5 mg O<sub>2</sub>/L, 7.29 y 20.25 °C respectivamente, y egresa con valores medios de DBO<sub>5</sub>, DQO, STD, pH y temperatura de 209.5 mg O<sub>2</sub>/L, 294.25 mg O<sub>2</sub>/L, 634.2 mg/L, 7.28 y 20.25 °C respectivamente.
4. La eficiencia del tratamiento terciario actual de la PTAR podría ser incrementada mediante la implementación de una propuesta de mejora que abarca los tratamientos primario y secundario, la construcción de un tanque de contacto de cloro, el cambio del desinfectante y el seguimiento constante del tratamiento terciario actual.

## **CAPÍTULO VII RECOMENDACIONES**

1. Evaluar la factibilidad económica y técnica de las propuestas de mejora planteadas para aumentar la eficiencia del tratamientos primario, secundario y especialmente del terciario de la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar como se recomienda en la propuesta de mejora.
2. Capacitar constantemente a los operarios de la PTAR en temas relacionados al mantenimiento y operación de la misma.
3. Elaborar un plan de mantenimiento de las áreas que conforman la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar para lograr obtener los resultados deseados de remoción de carga contaminante con la máxima eficiencia posible.
4. Impulsar la realización de más estudios de investigación en la PTAR del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar con el propósito que exista más bibliografía útil disponible acerca del tema que pueda servir como referencia para otras PTAR.

## CAPÍTULO VIII REFERENCIAS

- Aguilar, F. (2008). **Informe final: Sistema de tratamiento de agua residual del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar.** Guatemala: IAG Consultoría y Construcción.
- Apha et. al. (2005). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** (21. Ed.). Estados Unidos: Joint Editorial Board.
- AquaChlor (2015). **Identificación de desinfectantes.** Recuperado el 13 de junio de 2017 de: <http://aquachlorpool.com/recursos/literatura/guia-para-el-manejo-y-almacenamiento-de-cloros/identificacion-del-producto/>
- Arias, M. y Caballeros, H. (2012). **Guía para realizar el trabajo de graduación.** (3ª. Ed.). Guatemala, Guatemala: Serviprensa, S.A.
- Camp, T. (1946). **Sedimentation and the design of settling tanks.** (1ª. Ed.). Estados Unidos: ASCE.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). **Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados.** (1ª. Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, Inc
- Davis, M. y Masten, S. (2004). **Ingeniería y Ciencias Ambientales.** (1ª. Ed.). México D.F., México: McGraw-Hill, Inc.
- Diersing, N. (2009). **Water Quality: Frequently asked questions.** Florida, Estados Unidos. Recuperado el 25 de febrero de 2017 de: <http://floridakeys.noaa.gov/scisummaries/wqfaq.pdf>
- De León, R. (2017). **Evaluación técnica y propuesta de mejora de los filtros percoladores de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Rafael Landívar.** Tesis inédita. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. (2005). **Manual de tratamiento de aguas negras.** (1ª. Ed.). México D.F.: Editorial Limusa.

- Duttle, M. (1990). **Safe Use of Household Greywater**. Nuevo México, Estados Unidos. New Mexico State University. Recuperado el 08 de abril de 2017 de: <http://aces.nmsu.edu/pubs/ m/M106.html>.
- Henry, J. y Heinke, G. (1999). **Ingeniería Ambiental**. (2ª. Ed.). Estado de México, México: Prentice Hall.
- Klein, K. (2015). **Eficiencia de la remediación de parámetros de calidad de agua en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Cerra”, Villa Canales, Guatemala, 2008-2013**. Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Lavagnino, H. (2016). **Eficiencia en la remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Rafael Landívar, Campus Central**. Tesis inédita. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- Lemus, E. y Recinos, C. (2015). **Evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus Central de la Universidad Rafael Landívar para el reúso en riego del agua tratada como tratamiento terciario para la remoción de nutrientes**. Estudio especial. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- López, D. (2014). **Estudio de pre factibilidad para implementación de planta de tratamiento de aguas residuales municipales en el municipio de Palín, Escuintla, Guatemala, Centro américa**. Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Mandal, A. (2014). **Helmintos**. Estados Unidos. News Medical Life Science. Recuperado el 08 de abril de 2017 de: [http://www.news-medical.net/health/What-are-Helminths-\(Spanish\).aspx](http://www.news-medical.net/health/What-are-Helminths-(Spanish).aspx)
- Metcalf et. al. (1991). **Wastewater Engineering: Treatment, disposal and reuse**. (3ª. Ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc.
- Mihelcic, J. y Zimmerman, J. (2012). **Ingeniería Ambiental: Fundamentos, sustentabilidad y diseño**. (1ª. Ed.). México D.F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de la República de Guatemala. Acuerdo Ministerial 105-2008. **Manual General del Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos**. 2008. Guatemala.

- Parra, L. (2006). **Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable.** Tesis inédita. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Portillo, J. (2013). **Desarrollo de una propuesta para el sistema de desinfección de cloro gas, aplicado a la distribución del tanque Labor de Castilla, de la empresa ABASTESA.** Tesis inédita. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Presidencia de la República de Guatemala. Acuerdo Gubernativo 236-2006. **Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.** 2006. Guatemala.
- Recinos, C. y Barrios, M. (2010). **Guía para el muestreo y determinación de pruebas de laboratorio de planta-escuela de tratamiento de agua residual del Campus Central, Universidad Rafael Landívar.** Tesis inédita. Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- Ramalho, R. (1993). **Tratamiento de aguas residuales.** (1ª. Ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- Real Academia Española (2014). **Diccionario de la Lengua Española.** Recuperado el 25 de febrero de 2017 de: <http://dle.rae.es/?w=Caudal>
- Real Academia Española (2014). **Diccionario de la Lengua Española.** Recuperado el 13 de junio de 2017 de: <http://dle.rae.es/?w=Muestreo>
- Real Academia Española (2014). **Diccionario de la Lengua Española.** Recuperado el 13 de junio de 2017 de: <http://dle.rae.es/?w=Parámetro>
- Romero, J. (1996). **Acuquímica.** (1ª. Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (1999). **Potabilización del agua.** (3ª. Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2000). **Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño.** (1ª. Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Russell, D. (2012). **Tratamiento de las aguas residuales: Un enfoque práctico.** (1ª. Ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- Tebbutt, T. (1997). **Fundamentos de control de la calidad del agua.** (1ª. Ed.). México D.F., México: Editorial Limusa.
- US EPA. (1986). **Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection.** (1ª. Ed.). Cincinnati, Estados Unidos: Centro de información de investigación ambiental
- Winkler, M. (1996). **Tratamiento biológico de aguas de desecho.** (4ª. Ed.). México D.F., México: Editorial Limusa.

## ANEXOS

### ANEXO A GLOSARIO

<b>Aguas residuales</b>	Aguas que han sido impurificadas por la acción de contaminantes, sufriendo una pérdida en su calidad que puede ser mejorada por la acción de diversos tratamientos. (Ramalho, 1993).
<b>Aguas negras</b>	Aguas residuales contaminadas con materia fecal y orina de origen animal y humano. (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).
<b>Bacteria gramnegativa</b>	Bacteria que no se tiñe de azul o violeta con tinción de Gram, haciéndolo con color rosado. (Romero, 1996).
<b>Calidad del agua</b>	Descripción de la condición del agua respecto a sus características microbiológicas para un propósito o fin en específico. (Diersing, 2009).
<b>Carga</b>	Resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente. (Acuerdo Gubernativo 236-2006).
<b>Caudal</b>	Volumen de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo. Su unidad en el Sistema Internacional de unidades es el metro cúbico por segundo (m <sup>3</sup> /s). (RAE, 2014).
<b>Cloración</b>	Tratamiento con cloro del agua para mejorar su calidad microbiológica actual. (Tebbutt, 1997).
<b>Cloro combinado</b>	Cloro disuelto en el agua asociado a materia orgánica en forma de cloraminas. (Romero, 1996).

<b>Cloro diatómico</b>	Molécula formada por dos átomos de cloro. En condiciones normales de presión y temperatura se encuentra en forma gaseosa. (Henry y Heinke, 1999).
<b>Cloro libre</b>	Cloro disuelto en el agua no asociado a materia orgánica el cual se encuentra en forma de ácido hipocloroso HClO e iones hipoclorito ClO <sup>-</sup> . (Romero, 1996).
<b>Cloro residual</b>	Cloro libre o combinado que permanece activo luego de un período de contacto determinado. (Ramalho, 1993).
<b>Coliformes fecales</b>	Bacterias aerobias gramnegativas en forma de bacilos no formadoras de esporas y que, incubadas a 44.5° C, fermentan la lactosa en 48 horas con producción de gas pudiendo alojarse dentro del tracto digestivo de los seres humanos y de animales de sangre caliente. (Romero, 1996).
<b>Contaminante</b>	Sustancia o elemento que se encuentra presente en un medio al cual no pertenece o que lo hace en niveles que pueden causar efectos contrarios en el mismo o en quienes dependen de éste. (Davis y Masten, 2004).
<b>Cuerpo receptor</b>	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales. (Acuerdo Gubernativo 236-2006).
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	Cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos lleven a cabo la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable presente en el agua mediante procesos aerobios durante un período de cinco días y una temperatura de 20 °C. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

<b>Desinfectante</b>	Sustancia que elimina los microorganismos presentes en un medio en contacto con ellos. (Tebbutt, 1997).
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	Cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química de todas las sustancias susceptibles a ser oxidadas presentes en el agua utilizando ácido crómico como agente oxidante fuerte. (Russell, 2012).
<b>Ente generador</b>	Persona individual o jurídica, pública o privada responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor. (Acuerdo Gubernativo 236-2006).
<b>Helmineto</b>	Parásito que reside en el interior de los intestinos y ciertos órganos de los seres humanos y ciertos animales. (Mandal, 2014).
<b>Microcuenca</b>	Afluente que desemboca hacia una subcuenca o río secundario, el cual a su vez desagua en un río principal. (Aguilar, 2008).
<b>Microorganismo</b>	Organismo microscópico que puede tener origen animal o vegetal. (Romero, 1996).
<b>Muestra compuesta</b>	Dos o más muestras simples que se toman en intervalos determinados de tiempo y que se adicionan para obtener un resultado de las características de las aguas residuales o aguas para reúso. (Acuerdo Gubernativo 236-2006).
<b>Muestra simple</b>	Muestra tomada en una sola operación que representa las características de las aguas residuales o aguas para reúso en el momento de la toma. (Acuerdo Gubernativo 236-2006).

<b>Muestreo</b>	Selección de una pequeña parte estadísticamente determinada, utilizada para inferir el valor de una o varias características del conjunto. (RAE, 2017).
<b>Parámetro</b>	Dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación. (RAE, 2017).
<b>pH</b>	Medida de la acidez o alcalinidad de una solución debido a la concentración de iones hidrógeno que presenta. (Romero, 1996).
<b>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales</b>	Instalación que mejora los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales provenientes de un ente generador a través de diversos procesos físicos, químicos y biológicos que retiran los contaminantes del agua para evitar daños al ambiente y a la salud de todos los seres vivos que puedan entrar en contacto con ella. (Russell, 2012).
<b>Radiación UV</b>	Radiación electromagnética que tiene una longitud de onda entre 100 y 400 nm. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).
<b>Sólidos Totales Disueltos (STD)</b>	Total de residuos sólidos filtrables a través de una membrana porosa de 2.0 $\mu\text{m}$ . (Depto. de Sanidad de Nueva York, 2005).
<b>Temperatura</b>	Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K). (RAE, 2017).
<b>Tratamiento terciario</b>	Tratamiento avanzado a través del cual se busca aumentar la calidad del agua tratada en el tratamiento secundario de una planta de tratamiento de agua

convencional mediante la mejora de sus parámetros fisicoquímicos o microbiológicos. (Ramalho, 1993).

**Tricloro**

Nombre común utilizado para designar al ácido tricloroisocianúrico –TCCA–. (AquaChlor, 2015).

**Trihalometano  
(THM)**

Compuestos halogenados potencialmente dañinos para la salud formados por la interacción entre materia orgánica y elementos halógenos como el cloro. (Romero, 1996).

**ANEXO B**  
**ETIQUETA PARA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS**

**Figura 60.** Etiqueta utilizada para la identificación de muestras.

<b>IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA DE AGUA RESIDUAL</b>	<table border="1" style="display: inline-table;"><tr><td style="padding: 2px;"><b>MUESTRA</b></td><td style="width: 30px; height: 20px;"></td></tr></table>	<b>MUESTRA</b>	
<b>MUESTRA</b>			
Punto de muestreo: _____			
Día: _____ Fecha: _____ Hora: _____			
Condiciones de transporte: _____			
Temperatura (°C): _____			
Potencial de hidrógeno (pH): _____			
Examen a realizar: _____			
Tomada por: <b>LUIS ANTONIO GARCÍA GUTIÉRREZ</b>			
Interesado: <b>LUIS ANTONIO GARCÍA GUTIÉRREZ</b>			
Municipio: _____ Departamento: _____			

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**ANEXO C**  
**RESULTADOS ORIGINALES DE LOS**  
**MUESTREOS REALIZADOS EMITIDOS POR LAFYM**

Universidad de San Carlos de  
 Guatemala



Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
 y Microbiológicos LAFYM

1

**ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS**

No. de ingreso: 915	No. de muestras: 1 (una)
Dirigido a: Luis Antonio García	Captadas por: Personal ajeno a LAFYM
Captación: Salida de sedimentador secundario 1	Captación: 25/04/17 10:30 horas
Tipo de muestra: Residual	Ingreso al laboratorio: 25/04/17 12:07 horas Inicio del análisis: 25/04/17
Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM	Reporte final: 02/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	329,0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	246,0 mg/L
Coliformes fecales	1,0 x 10 <sup>7</sup> NMP/100 mL

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio **LAFYM**

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Heidy Chacón, QB.  
 Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
 Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
 QUÍMICA BIÓLOGA  
 C.O.L. 2323



Universidad de San Carlos de  
Guatemala



Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
y Microbiológicos LAFYM

1

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

No. de ingreso: 924

No. de muestras: 1 (una)

Dirigido a: Luis Antonio García

Captadas por: Personal ajeno a LAFYM

Captación: Salida de sedimentador secundario 1

Captación: 27/04/17 10:30 horas

Tipo de muestra: Residual

Ingreso al laboratorio: 27/04/17 12:12 horas

Inicio del análisis: 27/04/17

Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM

Reporte final: 03/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	331,0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	243,0 mg/L
Coliformes fecales	3,1 x 10 <sup>4</sup> NMP/100 mL

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Heidy Chacón, QB  
Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
QUÍMICA BIÓLOGA  
COL. 2323



Universidad de San Carlos de  
Guatemala



Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
y Microbiológicos LAFYM

1

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

No. de ingreso: 956  
Dirigido a: Luis Antonio García  
Captación: Salida de sedimentador secundario 1  
Tipo de muestra: Residual  
Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM

No. de muestras: 1 (una)  
Captadas por: Personal ajeno a LAFYM  
Captación: 03/05/17 10:30 horas  
Ingreso al laboratorio: 03/05/17 12:30 horas  
Inicio del análisis: 03/05/17  
Reporte final: 09/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	247,0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	186,3 mg/L
Coliformes fecales	1,1 x 10 <sup>6</sup> NMP/100 mL

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Heidy Chacón, QB.  
Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
QUÍMICA BIÓLOGA  
COL. 2323

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



1

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
y Microbiológicos LAFYM

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

No. de ingreso: 957

No. de muestras: 1 (una)

Dirigido a: Luis Antonio García

Captadas por: Personal ajeno a LAFYM

Captación: Descarga hacia río

Captación: 03/05/17 10:30 horas

Tipo de muestra: Residual

Ingreso al laboratorio: 03/05/17 12:30 horas

Inicio del análisis: 03/05/17

Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM

Reporte final: 09/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	185.0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	123,0 mg/L
Sólidos totales disueltos	526,0 mg/L
Coliformes fecales	2,4 x 10 <sup>5</sup> NMP/100 mL

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Heidy Chacón, QB.  
Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
QUÍMICA BIÓLOGA  
COL. 2323

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



1

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
y Microbiológicos LAFYM

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

No. de ingreso: 991

No. de muestras: 1 (una)

Dirigido a: Luis Antonio García

Captadas por: Personal ajeno a LAFYM

Captación: Salida de sedimentador secundario 1

Captación: 04/05/17 10:30 horas

Tipo de muestra: Residual

Ingreso al laboratorio: 04/05/17 12:00 horas

Inicio del análisis: 05/05/17

Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM

Reporte final: 11/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	371,0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	253,7 mg/L
Coliformes fecales	1,6 x 10 <sup>7</sup> NMP/100 mL

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Henry Chacón, QB.  
Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
QUÍMICA BIÓLOGA  
COL. 2323

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



1

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos  
y Microbiológicos LAFYM

## ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

No. de ingreso: 992

No. de muestras: 1 (una)

Dirigido a: Luis Antonio García

Captadas por: Personal ajeno a LAFYM

Captación: Descarga hacia río

Captación: 04/05/17 10:30 horas

Tipo de muestra: Residual

Ingreso al laboratorio: 04/05/17 12:00 horas

Inicio del análisis: 05/05/17

Envase: Recipiente no proporcionado por LAFYM

Reporte final: 11/05/17

ANÁLISIS	RESULTADO
DQO	315,0 mg/L
DBO <sub>5</sub>	226,0 mg/L
Coliformes fecales	1,6 x 10 <sup>7</sup> NMP/100 mL
Sólidos totales disueltos	630,0 mg/L

Métodos de Referencia: APHA-AWWA-WEF: *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, 21 ed.2,005*

\*Prohibida la parcial o total reproducción por el cliente u otra persona, sin la debida autorización escrita por parte del laboratorio LAFYM

\*Estos informe pertenecen única y exclusivamente a la muestra descrita, tal y como fue recibida en el laboratorio.

Heidy Chacón, QB.  
Analista



Licda. Ana E. Rodas García, QB.  
Jefatura LAFYM

Licda. Ana E. Rodas García  
QUÍMICA BIÓLOGA  
COL. 2323