



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
(ERIS)

**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE TRIHALOMETANOS TOTALES (THM)
POSTERIOR AL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN SISTEMAS TÍPICOS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA**

Ing. Carlos Jesús Antonio Sobalvarro Woods

Asesorado por el MSc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE NIVELES DE TRIHALOMETANOS TOTALES (THM)
POSTERIOR AL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN SISTEMAS TÍPICOS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA**

ESTUDIO ESPECIAL

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

POR

ING. CARLOS JESÚS ANTONIO SOBALVARRO WOODS
ASESORADO POR EL MSC. ING. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Julián Antonio Duarte

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DETERMINACIÓN DE NIVELES DE TRIHALOMETANOS TOTALES (THM) POSTERIOR AL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN SISTEMAS TÍPICOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha 27 de julio de 2020.

Ing. Carlos Jesús Antonio Sobalvarro Woods

cj.sobalvarro@gmail.com

Carné: 2005 11744

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.06212 y 06213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt



ERIS
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hídricos

Guatemala, 14 de febrero de 2022

M. Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado las modificaciones solicitadas por la
terna evaluadora del examen de estudio especial II del
documento de titulado:

**"Determinación de niveles de Trihalometanos (THM),
posterior al proceso de desinfección en sistemas típicos
de tratamiento de aguas residuales en Guatemala".**

Elaborado por el Ingeniero Carlos Jesús Antonio
Sobalvarro Woods previo a optar al grado académico de
Maestro en Ciencias de Ingeniería Sanitaria.

Me permito informarle mi satisfacción con las
modificaciones realizadas, por lo que le comunico que
dicho documento cuenta con mi **APROBACIÓN**.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me
suscribo de usted,

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS".

M. Sc. Ing. Zenón Ruch Santos
Asesor del estudio





ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 19 de mayo 2022

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

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

DETERMINACIÓN DE NIVELES DE TRIHALOMETANOS TOTALES (THM)
POSTERIOR AL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN SISTEMAS TÍPICOS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA

Presentado por el estudiante:

Ing. Carlos Jesús Antonio Sobalvarro Woods

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

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

**Adán Pocasangre
Collazos**

Firmado digitalmente por Adán
Pocasangre Collazos
Fecha: 2022.05.19 16:38:14 -06'00'

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



ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA
SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 20 de mayo de 2022

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, MSc. Ing. Zenon Much Santos y MSc. Ing. Julian Duarte Jiménez, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo de la estudiante **Ing. Carlos Jesús Antonio Sobalvarro Woods**, titulado: DETERMINACIÓN DE NIVELES DE TRIHALOMETANOS TOTALES (THM) POSTERIOR AL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN SISTEMAS TÍPICOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veinte días del mes de mayo de 2022.

Imprímase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Mi hijos

Para demostrarles con hechos que las metas y objetivos se cumplen con esfuerzo y dedicación, dejando fuera las excusas.

Mi esposa

Agradeciéndole todo el apoyo incondicional y por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS A:

Ingenieros de la ERIS	Por dar lo mejor de su conocimiento para la formación de profesionales en la materia.
Mis compañeros de promoción	Por el apoyo incondicional y por creer en mí.
MSc. Zenon Much	Por ser un líder y guía, y porque gracias a su apoyo he conseguido este logro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
ANTECEDENTES.....	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXIII
JUSTIFICACIÓN.....	XXV
ALCANCE	XXVII
LIMITANTES.....	XXIX
1. CLORO.....	1
1.1. Definición	1
1.2. Cloro y sus presentaciones	1
1.3. Propiedades físicas	1
1.4. Cloro residual.....	2
1.5. Cloro libre residual.....	2
1.6. Purificación y desinfección	3
1.6.1. Cloración.....	3
1.6.2. Productos utilizados para la desinfección	4
1.6.2.1. Hipoclorito de calcio.....	4
1.6.2.2. Tricloro.....	5
1.6.3. Otras formas de desinfección	6

	1.6.3.1.	Declaración	6
	1.6.3.2.	Tiempo de contacto	7
1.7.		Patógenos	8
	1.7.1.	Coliformes totales.....	8
	1.7.2.	Coliforme fecal.....	9
	1.7.3.	<i>Escherichia coli</i>	9
1.8.		Carga orgánica.....	9
1.9.		Organoclorados y cloraminas.....	9
1.10.		Trihalometanos (THM)	9
	1.10.1.	Situación actual	11
	1.10.2.	Acuerdo Gubernativo 236 – 2006.....	12
	1.10.2.1.	Artículo 20. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores	12
	1.10.2.2.	Artículo 21. Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos.....	13
	1.10.2.3.	Artículo 30. Límites máximos permisibles para personas nuevas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público ...	15
2.		AGUAS ORDINARIAS	17
	2.1.	Caracterización	17
	2.2.	Monitoreo	18
	2.2.1.	Muestra	18
	2.2.2.	Parámetros de ingreso y salida	19
	2.3.	Procesos de tratamiento	20
	2.3.1.	Tratamiento aerobio	20

2.3.2.	Tratamiento anaerobio.....	20
3.	METODOLOGÍA.....	21
3.1.	Determinación de número de muestras.....	21
3.1.1.	Distribución de probabilidad binomial	21
3.1.2.	Ensayo binomial	22
3.1.3.	Éxito.....	22
3.2.	Standard methods	24
3.3.	Muestreo.....	26
3.3.1.	Medición de parámetros	34
3.3.2.	Toma de muestras.....	34
3.3.3.	Pruebas de laboratorio	34
3.3.4.	Material y equipo	35
3.3.5.	Reactivos utilizados para la medición.....	36
3.4.	Valores de THM normados.....	36
4.	RESULTADOS	37
4.1.	Cloro residual.....	37
4.2.	Parámetros fisicoquímicos.....	38
4.3.	Trihalometanos.....	39
4.4.	Relaciones entre parámetros.....	41
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
5.1.	Gráficas	42
5.1.1.	Cloro residual.....	42
5.1.2.	Comparación entre límites US-EPA y valores promedio THM.....	48
5.1.3.	Relaciones entre parámetros.....	55
5.2.	Análisis de resultados.....	64

5.3. Método de desinfección en las plantas evaluadas	66
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS	77
APÉNDICES.....	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Número de muestras.....	25
2.	Ubicación PTAR evaluadas.....	26
3.	Medición de cloro residual entrada – salida oficinas zona 11	43
4.	Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 16	44
5.	Medición de cloro residual entrada – salida centro comercial Z.10.....	45
6.	Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 18	46
7.	Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 11	47
8.	Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 14	48
9.	Comparación entre THM y límites US-EPA, oficinas zona 11	49
10.	Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 16.....	50
11.	Comparación entre THM y límites US-EPA, centro comercial zona 10.....	51
12.	Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 18.....	52
13.	Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 11.....	53
14.	Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 14.....	54
15.	Comparación entre THM _{promedio} y límites US-EPA, todos los muestreos	55
16.	Relación turbiedad - THMs.....	56
17.	Correlación turbiedad – THMs	56
18.	Relación DBO - THMs.....	57
19.	Correlación DBO – THMs.....	58
20.	Relación nitrógeno - THMs.....	59
21.	Correlación nitrógeno – THMs	59

22.	Relación SST - THMs	60
23.	Correlación SST – THMs	61
24.	Relación pH - THMs.....	62
25.	Correlación pH – THMs	62
26.	Relación temperatura - THMs.....	63
27.	Correlación temperatura – THMs.....	63

TABLAS

I.	Especificación hipoclorito de calcio.....	5
II.	Características tricloro	6
III.	Consideraciones adicionales de los desinfectantes utilizados en el tratamiento de agua	7
IV.	Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores.....	14
V.	Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para entes generadores nuevos	15
VI.	Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público.....	15
VII.	Composición típica de aguas residuales.....	15
VIII.	Número de éxitos en casos probabilísticos.....	23
IX.	Información de PTAR evaluadas	27
X.	Listado de materiales y equipo	35
XI.	Resultados de cloro residual.....	38
XII.	Resultados de parámetros fisicoquímicos	39
XIII.	Resultados de trihalometanos	40
XIV.	Valores de trihalometanos normados de calidad de agua para consumo humano	40
XV.	Parámetros a relacionar.....	41

XVI.	Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con cloro	66
XVII.	Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con luz ultravioleta	68
XVIII.	Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con ozono	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Cl₂	Cloro
D	Día
H	Hora
M	Metro
µg/L	Microgramo por litro
%	Porcentaje
Σ	Sumatoria
T	Tiempo
U	Unidad

GLOSARIO

Afluyente	Caudal de agua que llega a una planta o unidad de tratamiento.
Aforar	Medir la cantidad de agua que lleva un fluido por unidad de tiempo.
Agua residual	Son las aguas que han recibido uso y cuyas características han sido modificadas.
Cuerpo receptor	Embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Materia orgánica	Es materia elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural.
Parámetro	Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.

**Plantas de tratamiento
de aguas residuales
domésticas**

Es la unidad o conjunto de unidades destinadas a mejorar la calidad del agua, de tal forma que produzcan en los cuerpos receptores efectos compatibles con las exigencias legales y/o con la utilización de aguas abajo de la población.

PTAR

Planta de tratamiento de aguas residuales

USEPA

United States Environmental Protection Agency
National

RESUMEN

El presente estudio tiene como fin determinar los niveles de trihalometanos totales (THM), posterior al proceso desinfección en sistemas típicos de tratamiento de aguas residuales. Conocer los impactos que se generan por la forma en que se están desinfectando las aguas residuales es importante para tomar decisiones en las acciones y actitudes que se están teniendo respecto de este tema.

Para esto fue necesario realizar análisis a muestras de agua residuales a la entrada y salida de seis plantas de tratamiento ubicadas en distintas zonas de la ciudad de Guatemala (zonas 11, 16, 18, 14 y 10), información que permita analizar parámetros de identificación sencilla para relacionar la presencia de THM, así como identificar cómo afecta el tipo de tratamiento su concentración.

De acuerdo con los resultados, de un total de 30 muestras realizadas, en las condiciones que se caracterizaron en cada punto, el 83 % genera THM por encima de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos. Como se observa en los resultados de cloro residual, se puede aseverar que todas las muestras contenían cloro, lo que garantiza que los trihalometanos fueron generados por la aplicación del tricloro.

Sobre las relaciones de los parámetros estudiados con los trihalometanos, el 33 % de ellos cuenta con un vínculo de interés, ya que su comportamiento es similar, tanto si este aumenta o disminuye. Los que tienen afinidad con materia orgánica, se puede indicar que son la DBO₅, los sólidos suspendidos y la turbiedad.

Se establecieron los valores de correlación entre el promedio THM respecto de los parámetros turbiedad (0,6735), DBO (0,9073), nitrógeno (0,6477), sólidos suspendidos totales (0,4692), pH (0,3865) y temperatura (0,2331).

OBJETIVOS

General

Determinar los niveles de trihalometanos totales (THM), posterior al proceso de desinfección en sistemas típicos de tratamiento de aguas residuales.

Específicos

- Definir parámetros de identificación sencilla para relacionar la presencia de los trihalometanos.
- Identificar el ambiente por el cual se generarían los trihalometanos.
- Relacionar la tecnología anaerobia y aerobia, con los niveles de los subproductos de la desinfección.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, el método de desinfección más económico en el tratamiento de aguas residuales es la cloración, lo que puede representar un problema de contaminación grave tanto a nivel urbano como rural, que puede afectar los mantos freáticos, pozos de agua artesanales y demás fuentes de abastecimiento.

De acuerdo con el trabajo realizado, la información sobre la formación y determinación de trihalometanos debido a la desinfección del agua residual o los subproductos generados por el contacto entre el cloro (hipoclorito de calcio y triclorocianuro) y los elementos encontrados en las aguas residuales posterior a los tratamientos comunes, es escasa, ya que la mayoría de los trabajos y documentos abordan el tema del agua potable.

Por esta razón se realizó el presente trabajo, con el objetivo de determinar los niveles de trihalometanos totales (THM), posterior al proceso desinfección en sistemas típicos de tratamiento de aguas residuales. Se tomaron muestras de agua residual a la entrada y salida de sistemas de tratamiento aerobios y anaerobios, ubicados en distintas zonas de la ciudad (zonas 11, 16, 18, 14 y 10), las que fueron analizadas en el laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabanini de Molina” de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Los resultados se analizaron por medio de paquetes estadísticos y el uso de hojas electrónicas y gráficas.

HIPÓTESIS

Se generan trihalometanos totales (THM) debido a la cloración del agua residual en el proceso de desinfección en plantas de tratamiento de agua residual, para el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 en niveles mayores al permitido por la OMS, siendo el límite de 200 µg/L.

ANTECEDENTES

En la actualidad existen varias suposiciones, ya que no se encontraron estudios específicos dedicados a la formación y determinación de trihalometanos debido a la desinfección del agua residual o los subproductos generados por el contacto entre el cloro (hipoclorito de calcio y triclorocianuro) y los elementos encontrados en las aguas residuales, posterior a los tratamientos comunes.

Las referencias encontradas con mayor aporte para el presente trabajo corresponden a la desinfección por medio del hipoclorito en el agua potable: es por ello que se citan las más importantes para enriquecer el estudio. Los decretos y reglamentos centroamericanos vigentes hacen mención de los trihalometanos únicamente en el agua potable, como se describe a continuación:

- En Costa Rica, el *Decreto Ejecutivo No. 38924-S, Reglamento para la calidad del agua potable (2007)*, en el anexo 1, cuadro No. 5, Parámetros de calidad de agua nivel cuarto (N4), da referencias de los trihalometanos, en las cuales, su valor máximo admisible (VMA) lo tiene en el cloroformo, con 200 µg/l.
- El *Reglamento técnico panameño del COPANIT y DGNTI (1999)*, presenta en el capítulo 3.4, correspondiente a las características químicas orgánicas, tabla No. 4, valores máximos permitidos de 0.1 mg/l.
- En Honduras, la *Norma técnica para la calidad del agua (1995)*, en el anexo 1 parámetros de calidad de agua, cuadro 8, parámetros para

desinfectantes y subproductos de la desinfección indica que, para el cloroformo es de 200 µg/l.

- El *Reglamento técnico salvadoreño* (2018), en su anexo 1, que se refiere a otros parámetros de riesgo para la salud, tabla III, desinfectantes y subproductos de desinfección, tiene como límite máximo permisible a los THM Cloroformo en 0.3 mg/l.
- La *Ley general de aguas nacionales* de Nicaragua no menciona a los trihalometanos como requerimiento mínimo para la calidad del agua.

A nivel internacional se han realizado diferentes estudios sobre el tema; se presentan algunos de los consultados:

- La OMS, en su *Guía para la calidad del agua potable* en su primera edición (1984), recomienda valores permisibles únicamente del cloroformo en 0.3 mg/l, ya que dispone de pocos datos de los demás trihalometanos. En la segunda edición (1993), no publicó niveles de referencia de los trihalometanos totales, pero sí recomienda a las autoridades de los países que, con base en las guías del mismo año, niveles de 0.2 mg/l para el cloroformo y 0.1 mg/l para el bromoformo; esto se mantuvo en la siguiente edición (1998).
- En España, en el *Estudio de los subproductos de la desinfección de aguas residuales con hipoclorito: cloratos y trihalometanos* (2019) realizado en diversas plantas de tratamiento PTAR en la región de Murcia, se concluye que, en la desinfección con hipoclorito, este adiciona cloratos al agua y genera trihalometanos, siendo el principal compuesto el cloroformo. Esto debido a que el Real Decreto obliga que los *E-coli* deben estar entre 0 –

1000 UFC/100 ml; por ello, obliga a desinfectar el agua. También menciona el tiempo mínimo de contacto de 30 minutos para hacer efectivo el proceso. Del mismo modo, hace mención de la opción del ozono y UV; sin embargo, resulta costosa su inversión inicial y su mantenimiento. De ese estudio se obtienen resultados, en la salida de cloración, en donde las concentraciones se presentaron en su máximo nivel, con resultados de 70 µg/l (Lahora *et al.* 2019)

- El Centro Superior de Investigaciones Científicas en España (2006) publicó el estudio *Presencia del elemento amonio en aguas residuales*, concluyendo que este evita que el cloro reaccione con la materia orgánica, impidiendo la formación de sustancias. El amonio se encuentra en las aguas residuales en concentraciones variables, pero es muy escaso en las aguas de bebida.

En dichos estudios, los efluentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, tal es el caso de la ubicada en Platja de Aro (Girona), Mataró (Barcelona) y Lloret (Girona), fueron sometidos a desinfección, arrojando niveles de trihalometanos inferiores a 20 microgramos por litro, por debajo de los niveles límites establecidos por la legislación europea actual (150 microgramos por litro), y menor de la futura actualización al año 2009, que será de 100 microgramos por litro. Las conclusiones de estos resultados indican que, la presencia de amonio en dichas muestras hace menor la formación de los trihalometanos (Rodríguez, 2006).

A nivel nacional, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala (ERIS), inició las investigaciones sobre tratamiento apropiado de aguas residuales domésticas en la década de los años setenta. En Guatemala, en el 2006, fue aprobado el

Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual inicia el seguimiento para la regulación y tratamiento de la descarga de agua residual en Guatemala, tomando en cuenta muchas condiciones y parámetros para la misma. Sin embargo, se cuenta con poca información sobre determinación o presencia de los trihalometanos en aguas residuales tratadas; en la actualidad se pueden mencionar los siguientes estudios realizados por los egresados de la ERIS y relacionados con el tema de interés.

- Determinación de la presencia de trihalometanos totales (THM's) como subproducto de la desinfección en el proceso de potabilización de agua superficial para consumo humano, por el Ing. Álvaro Francisco Ramírez Vásquez, Guatemala, 2020.
- Determinación de la presencia de trihalometanos totales (THM's), en agua para consumo humano proveniente de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala, por el Ing. Erikson Alexander Núñez Cerrato (2020).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La importancia de conocer los impactos que se generan por la forma en que se están desinfectando las aguas residuales, es el mayor interés. Esto para tomar decisiones en las acciones y actitudes que se están teniendo respecto de este supuesto. De la misma manera, hasta el momento se desconoce la calidad de agua que descargan las industrias, teniendo en cuenta que no existen inventarios de las empresas, y menos se tienen agrupados los gremios para su fácil detección.

Todo esto estará en un limbo científico, tanto en su detección, como en su mapeo, que sería genial tenerlo de dicha manera, para muestrear la calidad del agua de cada ente generador, dispuesta en cuerpos receptores, ya que estos, luego de su vertido, podrían causar enfermedades del grado cancerígeno a poblados desprotegidos y menos afortunados por utilizar fuentes contaminadas de agua.

De esa manera, no se tiene la capacidad, como país, mucho menos como institución educativa, de conocer calidades de agua que se puedan y no se puedan usar, mucho menos alertar para la no utilización de lotes completos de aguas residuales con potenciales contaminantes. Por lo que, surge la siguiente pregunta:

¿Se estarán generando trihalometanos en las aguas residuales por clorar, únicamente por cumplir el Acuerdo Gubernativo 236-2006?

JUSTIFICACIÓN

Desde la década anterior hasta la actualidad, el tema de las aguas residuales ha tomado importancia, así como otros los temas relacionados con ello. Entre estos el caso de los subproductos de la cloración del agua residual, mencionando puntualmente a los trihalometanos totales; esto por la necesidad de desinfectar las aguas debido a una posible fuente de abastecimiento aguas abajo.

La disposición final de las aguas residuales en cuerpos receptores y alcantarillados municipales no garantizan que dichas aguas, no lleguen a poblaciones aguas abajo, donde sus fuentes de abastecimiento hayan sido cloradas, y por ello, contaminadas debido a sus componentes y reacciones químicas entre materia orgánica y el cloro, que, al momento, se sabe que generan trihalometanos.

El Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN en su *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*, establece los niveles de coliformes fecales permisibles, tanto para la descarga de aguas residuales a cuerpos receptores, como para entes generadores nuevos para aguas residuales municipales y de urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público y para descargas al alcantarillado público en su última etapa (se enfocará en la fecha máxima de cumplimiento: dos de mayo de dos mil veinticuatro), establece el límite en $< 1 \times 10^4$, por lo que es necesaria la desinfección de dichas aguas para el cumplimiento del parámetro. El proceso más económico para la desinfección es por medio de pastillas de hipoclorito de calcio o triclorocianuro.

Debido al aumento en la cantidad de plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR, tanto en el ámbito público, como en el desarrollo exponencial de la entidad privada, incluyendo área residencial, comercial e industrias, se ha generado la necesidad de determinar los niveles de trihalometanos, y definir los parámetros que se deberán enfocar para saber la presencia de dichos subproductos.

Se sabe que los costos de la determinación de los THM's son elevados para los presupuestos que actualmente se maneja en el ámbito y que se ha visto el poco interés de invertir en la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Es por ello que, con base al presente estudio, donde lo que se quiere es obtener la mayor cantidad de información y saber todos los indicativos y presuntivos para que se presente una guía sencilla que sirva para indicar la presencia del componente químico trihalometanos en el agua y así alertar a las entidades responsables respecto de evitar el consumo de dicha agua debido a su presunta relación con enfermedades cancerígenas.

ALCANCE

El presente estudio de investigación tiene por alcance determinar si en las aguas residuales, luego de un tratamiento biológico y su proceso de desinfección por medio de cloro en sus distintas presentaciones llevado a cabo en plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR), se están generando trihalometanos. Para esto es necesario tomar muestras de agua residual de plantas de tratamiento de aguas residuales, tanto aerobias como anaerobias para diversificar las muestras en distintas zonas de la ciudad (11, 16, 18, 14 y 10).

Una vez obtenidas las muestras, las cuales se mantuvieron en condiciones ideales, se procedió a analizarlas en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabanini de Molina” de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

LIMITANTES

Entre los desafíos y limitaciones durante realización del estudio, está el de la obtención de los reactivos para la determinación del parámetro en estudio, ya que, al no ser común analizar dicho elemento en Guatemala, los reactivos no se encuentran de inmediato y el precio es alto, tratándose de un estudio universitario.

Otro aspecto que se debe incluir en las limitaciones es que el kit únicamente mide THM totales, y no indica la especie encontrada, lo que podría ayudar a conocer exactamente el compuesto encontrado (cloroformo, bromoformo o yodoformo), en cada muestra y así tener una solución a dicho problema.

También, la publicación de resultados en cuanto a las cantidades de THM generados, podría ser de manejo confidencial puesto que se expone a comunidades enteras cuya fuente de abastecimiento sea ríos con aguas residuales. También, las entidades responsables de la calidad de los efluentes a nivel nacional se podrían ver involucradas en problemáticas locales.

1. CLORO

1.1. Definición

Elemento químico de número atómico 17 situado en el grupo de los halógenos de la tabla periódica; su símbolo es Cl. Es un elemento abundante en la naturaleza y se trata de un elemento químico esencial para muchas formas de vida.

En la naturaleza no se encuentra en estado puro ya que reacciona con rapidez con muchos elementos y compuestos químicos; por esta razón se encuentra formando parte de cloruros, cloritos y cloratos, en las minas de sal y disuelto en el agua de mar.

1.2. Cloro y sus presentaciones

El cloro es la sustancia más usada en el mundo como desinfectante para el agua, no importando el fin que se dará a esta. En Guatemala, debido al bajo costo que tiene, es el más utilizado en las plantas de tratamiento, tanto de agua potable como de agua residual. “Los compuestos de cloro más comúnmente usados en las PTAR son el cloro gas (Cl_2), el hipoclorito sódico (NaOCl)₂, y el dióxido de cloro (ClO_2)” (Brenes Varo, 2006, p. 29).

1.3. Propiedades físicas

A continuación, se presentan las principales propiedades físicas del cloro:

- Estado ordinario: gas
- Densidad: 3.214 kg/m³
- Punto de fusión 171.15 Kelvin (-102 °C)
- Punto de ebullición: 239.16 Kelvin (-34 °C)

1.4. Cloro residual

El cloro es el agente desinfectante más utilizado en el mundo para el agua potable, por las siguientes razones:

- Su carácter fuertemente oxidante, responsable de la destrucción de los agentes patógenos y numerosos compuestos causantes de malos sabores.
- Su más que comprobada inocuidad a las concentraciones utilizadas.
- La facilidad de controlar y comprobar unos niveles adecuados por medio de sencillas pruebas de campo

La Organización Mundial de la Salud (2006) señala que no se ha observado ningún efecto adverso en humanos expuestos a concentraciones de cloro libre en agua potable. No obstante, establece un valor guía máximo de cloro libre de 5 miligramos por litro (equivalente a 5 ppm); afirma explícitamente que se trata de un valor conservador.

1.5. Cloro libre residual

Según su origen, las aguas residuales son el resultado de la combinación de los residuos líquidos y sólidos, utilizando como medio de transición el agua

que proviene de residencias, oficinas, edificaciones comerciales e instituciones; en general; las aguas residuales de origen doméstico son aquellas que se utilizan con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavanderías, entre otros).

1.6. Purificación y desinfección

El cloro es un químico importante en la desinfección del agua (en plantas de tratamiento), es más de tres veces efectivo como agente desinfectante contra la *Escherichia coli* que una concentración equivalente de bromo, y más de seis veces más efectiva que una concentración equivalente de yodo.

El cloro suele ser usado en la forma de ácido hipocloroso para eliminar bacterias, hongos, parásitos y virus en los efluentes de agua residual. Se utiliza en su presentación de tabletas sólidas de isocianurato clorado. Debido a lo impráctico que se vuelve almacenar gas cloro para el tratamiento de agua, se usan métodos alternativos. Estos incluyen soluciones de hipoclorito, que gradualmente liberan cloro al agua, como los dicloro y tricloro. Estos compuestos son estables en estado sólido y pueden ser usados en forma de polvo, granular o tableta.

1.6.1. Cloración

Es el procedimiento de desinfección de aguas mediante el empleo de cloro o compuestos clorados. Normalmente se emplea hipoclorito de sodio por su mayor facilidad de almacenamiento y dosificación; en algunos casos se emplea también como hipoclorito de calcio o ácido clorisocianúrico.

1.6.2. Productos utilizados para la desinfección

Existen varios productos que se utilizan para la desinfección de aguas residuales; estos se describen a continuación.

1.6.2.1. Hipoclorito de calcio

El hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) se ha convertido en una alternativa muy atractiva para los procesos de desinfección de aguas residuales, debido a que presenta una serie de grandes ventajas frente al uso de componentes más comunes como el cloro.

El producto químico se encuentra disponible en el mercado, comúnmente en polvo o estado granulado, algunas de sus características son:

- Alta concentración de cloro activo: varía con el tiempo, ya que al salir de la planta tiene una concentración específica, pero durante el transporte cambia, al igual que al ser almacenada; depende de cómo sean las condiciones la variación que tenga, suele oscilar entre el 65 % y el 70 %.
- Importancia de la temperatura: este es un factor que se debe tener presente principalmente para su almacenamiento, pues influye de manera significativa en el nivel de concentración de cloro.
- Seguridad para la manipulación: es bastante sencillo de utilizar y no se corre ningún riesgo durante su uso.

- Alta efectividad: cuenta con una alta efectividad al desinfectar y purificar el agua, debido a los niveles de cloro que contiene y su capacidad para permanecer activo por mayor tiempo.

Tabla I. **Especificación hipoclorito de calcio**

Parámetro	Especificaciones
Apariencia	Blanco, polvo o en tabletas
Olor	Parecido al cloro
Solubilidad en agua	18% a 25°C
Humedad	< 16%
pH	10.4 - 10.8 (solución al 1% en agua destilada neutral a 25°C)
Densidad	0.8 g/cc (Granular) 1.9 g/cc (Tabletas)

Fuente: Arch Chemicals, Inc. *Hipoclorito de calcio*. Consultado el 12 de noviembre de 2021. Recuperado de https://www.dnb.com/business-directory/company-profiles.arch_chemicals_inc.3ead90ec2b1550382f6f471ada3b18c3.html.

1.6.2.2. Tricloro

El ácido tricloroisocianúrico (TCCA) se utiliza principalmente para desinfección de piscinas y spas, prevención y curación de enfermedades en la industria de alimentos, preservación de vegetales y para tratamiento de aguas negras.

Tabla II. **Características del tricloro**

CALIDAD ESTÁNDAR ÍTEM		
Grado	Grado alto	Resultado
Apariencia	Blanco o gris claro	Blanco o gris claro
Cloro efectivo	90	90.5
Valor pH	2.7 – 3.3	3.1
Humedad	0.50 %	0.45 %

Fuente: elaboración propia.

1.6.3. Otras formas de desinfección

Existen otras formas de desinfección también efectivas, las que se presentan a continuación:

- Dióxido de cloro
- Cloruro de bromo
- Ozono
- Rayo ultravioleta

1.6.3.1. Decloración

Es la práctica que consiste en la eliminación de la totalidad del cloro combinado residual presente en el agua después de la cloración, para reducir los efectos tóxicos de los efluentes descargados a los cursos de agua receptores o destinados a la reutilización.

Los elementos que se pueden utilizar para este método son:

- Dióxido de azufre
- Carbón activado
- Sulfito de sodio
- Metabisulfito de sodio

Tabla III. **Consideraciones adicionales de los desinfectantes utilizados en el 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: Greenfacts. *Desinfectantes del agua y sus productos*. Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de <https://www.greenfacts.org/es/desinfectantes-agua/index.htm>

1.6.3.2. Tiempo de contacto

Según Metcalf y Eddy (1995), debido a que el cloro reacciona con los compuestos del nitrógeno presentes tanto en las aguas residuales tratadas como

en las no tratadas, no se puede omitir el importante papel que desempeña el tiempo de contacto en la desinfección del agua residual.

A causa de la importancia del tiempo de contacto, para obtener una desinfección efectiva se puede emplear tanto un reactor de flujo en pistón como uno de alimentación discontinua. Sin embargo, dado el escaso valor práctico de los reactores de alimentación discontinua para las aplicaciones de cloración, en la mayoría de las plantas se instalan reactores de flujo en pistón.

1.7. Patógenos

Se denomina patógeno a todo agente biológico externo que se aloja en un ente biológico determinado, dañando de alguna manera su anatomía, a partir de enfermedades o daños visibles o no. A este ente biológico que aloja a un agente patógeno se le denomina huésped, hospedador o también hospedante, en cuanto es quien recibe al ente patógeno o lo alberga en su cuerpo.

Se menciona este concepto, ya que uno de los motivos por el cual se decide hacer una desinfección en el agua final que se va a disponer, es debido a que, no se sabe si comunidades aguas abajo harán uso de las que se han tratado previamente.

1.7.1. Coliformes totales

Son bacterias en forma de bacilos, aerobios y anaerobios facultativos, Gram negativos o no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y de gas a 35 °C en un período de 24 a 48 horas; estas características se investigan por el método de los tubos múltiples de fermentación, para el caso de la determinación del grupo coliforme total.

1.7.2. Coliforme fecal

Son las bacterias que forman parte del grupo coliforme total, que fermentan la lactosa con producción de gas a 44 °C en un período de 24 horas, cuando se investigan por los tubos múltiples de fermentación. Al grupo coliforme fecal también se le designa como termotolerante o termorresistente.

1.7.3. *Escherichia coli*

Son bacterias coliformes fecales que fermentan la lactosa y otros sustratos adecuados, como el manitol a 44 °C con producción de gas; también producen indol a partir de triptófano.

1.8. Carga orgánica

Cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua residual. Se expresa como los kilogramos de DBO por día, por unidad de volumen del medio filtrante por unidad de tiempo, kg/(m³ d).

1.9. Organoclorados y cloraminas

Son productos químicos cancerígenos formados en el proceso de la cloración por la reacción con la materia orgánica presente.

1.10. Trihalometanos (THM)

Son un subconjunto de los organoclorados, derivados del metano (CH₄), de cuya molécula son sustituidos tres átomos de hidrógeno por igual número de halógenos (cloro, bromo o yodo). La sustitución puede ser hecha por un solo

compuesto, por ejemplo, triclorometano, o por una mezcla como en bromodichlorometano. Algunos de ellos poseen nombres especiales como: Cloroformo (CHCl_3), bromoformo (CHBr_3), y yodoformo (CHI_3). Siendo el de más ocurrencia y por ende más estudiado el cloroformo (Tchobanoglous, 2012).

Cáceres, (1990) propone cuatro aspectos que controlan la formación de los THM:

- Cantidad de cloro: cuando existe una gran demanda de cloro o el sistema es operado con elevados residuales hay mayor probabilidad de formar cloroformo y otros THM.
- Temperatura: cuanto más caliente es el agua, mayor es la posibilidad de formar THM's. Diversos experimentos realizados con el mismo pH y la misma dosis de cloro, demostraron que al variar la temperatura entre 3 a 401 °C, la concentración de cloroformo aumenta de 30 a 200 mg/L.
- pH: la formación de THM's es mayor conforme aumenta el pH del agua, por su acción catalítica sobre el haloformo.
- Sólidos suspendidos: reducen tanto la velocidad de producción como la cantidad de THMs formados.

Los trihalometanos son regulados por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de E.E. U.U, por sus siglas en inglés), para protección ecológica y de la salud humana. La concentración límite en agua potable es de 80 $\mu\text{g/L}$. La concentración de THM's en las aguas superficiales durante el verano supera la concentración en invierno debido al aumento en la temperatura y la cantidad de materia orgánica presente.

“La concentración de THM’s en el agua superficial normalmente es mayor que la que se encuentra en las aguas subterráneas debido a la variación de materia orgánica presente en el agua” (Gómez Sierra, 2014, p. 23).

Los THM incrementan la mortalidad por cáncer después de un consumo prolongado. En especial, se ha demostrado que el cloroformo es absorbido rápidamente por la mucosa intestinal, se distribuye en los tejidos y se acumula en el tejido adiposo donde tiene una larga vida media. Su metabolismo se produce principalmente en el hígado y en menor proporción en los riñones y otros tejidos.

Sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (2004) recomienda nunca omitir la desinfección del agua de suministro por el riesgo de formar THM cuando no es posible aplicar otro método. Conviene señalar que los THM, no se forman exclusivamente durante el tratamiento de agua, sino aún después de realizada la cloración.

1.10.1. Situación actual

En Guatemala el método de desinfección más económico en el tratamiento de aguas residuales es la cloración; sin embargo, la información sobre la formación y determinación de trihalometanos debido a la desinfección del agua residual o los subproductos generados por el contacto entre el cloro (hipoclorito de calcio y triclorocianuro) y los elementos encontrados en las aguas residuales posterior a los tratamientos comunes es escasa.

1.10.2. Acuerdo Gubernativo 236 – 2006

En el año 2006 fue aprobado el Acuerdo Gubernativo 236-2006, el cual inicia el seguimiento para la regulación y tratamiento de la descarga de agua residual en Guatemala, tomando en cuenta muchas condiciones y parámetros para la misma.

1.10.2.1. Artículo 20. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

Detalla los límites a los cuales está sujeta, específicamente, la parte de la microbiología en cuanto a descargas de aguas residuales a cuerpos receptores. Es importante mencionar que se describe cada una de las etapas a las cuales está sujeto el cumplimiento para entes generadores existentes, previos al 5 de mayo 2006.

Tabla IV. Límites máximos permisibles de descargas a cuerpos receptores

			Fecha máxima de cumplimiento			
			02/05/2011	02/05/2015	02/05/2020	02/05/2024
			Etapa			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	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	Miligramos por litro	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fósforo total	Miligramos por litro	50	40	20	10	10

Continuación de la tabla IV.

Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes totales	Miligramos por litro	< 1 x 10 ⁸	< 1 x 10 ⁸	< 1 x 10 ⁵	< 1 x 10 ³	< 1 x 10 ²
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades Platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TRC = temperatura cuerpo receptor grados Celsius

Fuente: MARN. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2016/04/07-Acuerdo-Gubernativo-236-2006.pdf>.

1.10.2.2. Artículo 21. Límites máximos permisibles para entes generadores nuevos

Este artículo presenta los parámetros para todo aquel, quien se conciba luego del 5 de mayo de 2006, para que cumpla con los parámetros indicados en la tabla V, los entes generadores nuevos deberán cumplir, desde el inicio de sus operaciones, con una meta de tres mil kilogramos por día de DBO, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos Mg/L de DBO. En el caso de que el parámetro de calidad asociado sea igual o menor a 100 mg /L en la DBO, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de DBO.

Tabla V. **Límites máximos permisibles de descarga a cuerpos receptores para entes generadores nuevos**

		Fecha máxima de cumplimiento				
		02/05/2011	02/05/2015	02/05/2020	02/05/2024	
		Etapa				
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR+/- 7	TCR+/- 7	TCR+/- 7	TCR+/- 7	TCR+/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	100	50	10	10	10
Materia flotante	Miligramos por litro	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fosfora total	Miligramos por litro	50	40	20	10	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 totales	Miligramos por litro	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^7$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^3$	$< 1 \times 10^3$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1

		Fecha máxima de cumplimiento				
		02/05/2011	02/05/2015	02/05/2020	02/05/2024	
		Etapa				
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Mili*gramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades Platino cobalto	1500	1000	750	500	500

Fuente: MARN. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2016/04/07-Acuerdo-Gubernativo-236-2006.pdf>.

1.10.2.3. Artículo 30. Límites máximos permisibles para personas nuevas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público

Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, a las personas nuevas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, se les requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, deberán cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en la siguiente tabla.

Tabla VI. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	60
Materia flotante	Miligramos por litro	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	200
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	40
Fosfora total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes totales	Miligramos por litro	< 1 x 10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0,1
Cadmio	Miligramos por litro	0,1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0,1
Mercurio	Miligramos por litro	0,01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0,4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades Platino cobalto	500

Fuente: MARN. *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2016/04/07-Acuerdo-Gubernativo-236-2006.pdf>.

2. AGUAS ORDINARIAS

Son las aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.

2.1. Caracterización

Para identificar y clasificar el tipo de afluentes y efluentes en estudio, se realizó la caracterización de muestras de aguas en PTAR ubicadas en la ciudad de Guatemala; incluye la determinación de las características físicas, químicas y biológicas, incluyendo caudal, por medio de un análisis de agua para determinar niveles de parámetros de interés; en este caso, los parámetros del *Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. El Ministerio de Ambiente en su mesa técnica, acordaron de interés los siguientes parámetros:

- Temperatura
- Potencial de hidrógeno
- Grasas y aceites
- Materia flotante
- Sólidos suspendidos totales
- Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a 20 Celsius
- Demanda química de oxígeno
- Nitrógeno total
- Fósforo total

- Arsénico
- Cadmio
- Cianuro total
- Cobre
- Cromo hexavalente
- Mercurio
- Níquel
- Plomo
- Zinc
- Color
- Coliformes fecales

2.2. Monitoreo

Proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada, para establecer el comportamiento de los valores de los parámetros de efluentes, aguas para reuso y lodos. De acuerdo con Barreto Sáenz (2010), monitoreo “es la determinación continua o periódica de la cantidad de contaminantes, físicos, químicos, biológicos o su combinación en un recurso hídrico” (p. 6).

2.2.1. Muestra

Es la parte representativa que se va a analizar de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos; “es una o más porciones de un volumen de agua, colectadas en cuerpos receptores, descargas, efluentes o vertimientos industriales, redes de abastecimiento público, entre otros. Con el fin de determinar sus características físicas, químicas, fisicoquímicas o biológicas” (Barreto Sáenz, 2010, p. 6).

2.2.2. Parámetros de ingreso y salida

En aguas ordinarias según Metcalf y Eddie 1995, se tiene una composición típica del agua residual doméstica bruta, conforme a los siguientes parámetros:

Tabla VII. **Composición típica de aguas residuales**

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Medio	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1.200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l: 5 días, 20 °C (DBO ₅ , 20 °C)	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1.000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros ^a	mg/l	30	50	100
Sulfato ^a	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales ^b	n.º/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg/l	< 100	100-400	> 400

Fuente: Metcalf & Eddy, Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. Consultado el 10 de noviembre de 2021. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/1lapOprNakwy0HcKKoE1yw3ENgFGp4iiV/view?fbclid=IwAR2HjbAhnzdOWpjDCp58lu3JHAigiCenbfPI9ftNgJfjjPfpPy2oM9vs6M4c>.

De la tabla anterior se considera la columna de concentraciones tipo fuerte, ya que los casos de estudio tendrán parámetro de ingreso muy similares a los clasificados en mención.

2.3. Procesos de tratamiento

Se identifican y describen en cada caso los procesos de tratamiento de las plantas evaluadas. Esto con el fin de ubicar cada uno de los tipos con sus respectivos resultados.

2.3.1. Tratamiento aerobio

Son los procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno.

2.3.2. Tratamiento anaerobio

Es el proceso en el cual se degrada el material orgánico y se produce biogás (compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono). Se lleva a cabo en diferentes lugares en donde se encuentre disponible materia orgánica y el potencial redox sea bajo (ausencia de oxígeno).

En este proceso, la cantidad de lodos producidos en exceso es muy pequeña y este se encuentra bien estabilizado. También se produce energía útil en forma de biogás. Es importante mencionar que la digestión anaerobia únicamente remueve los contaminantes orgánicos

3. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología utilizada en el estudio realizado, la que incluye actividades de campo y gabinete.

3.1. Determinación de número de muestras

Para la validez del estudio realizado es importante determinar el número de muestras, con base en la totalidad de casos.

3.1.1. Distribución de probabilidad binomial

La distribución binomial es una distribución de probabilidad de variables discretas que cuenta el número de éxitos en una frecuencia de n ensayos independientes entre sí.

Información para el análisis de la distribución de probabilidad binomial:

- Punto de muestreo: seis plantas de tratamiento de agua residual de la ciudad de Guatemala.
- Diseño de muestreo: la toma de muestra en el tanque posterior al tanque de contacto de cloro por PTAR de cada muestra será nulo, pues se tomarán todas en un mismo día.
- Identificación de la variable dependiente: trihalometanos (THM)

- Cuantificación: valor esperado (referencia norma COGUANOR 29001)
 - Dentro de la norma: $x \leq 300 \frac{\mu\text{g}}{\text{l}}$
 - Fuera de la norma: $x > 300 \mu\text{g/l}$

- Limitantes: logística y económica en el número total de muestras disponibles, $n = 30$

- Para cada punto de muestreo: n_i
 - 2 plantas con $n = 7$ muestras
 - 2 plantas con $n = 8$ muestras

- Análisis individual por planta ($n = 7$ a 8 muestras)

3.1.2. Ensayo binomial

La distribución binomial es un modelo de probabilidad que se puede usar en las situaciones que se ajustan a lo que se denomina un experimento binomial. Definiciones y consideraciones:

- N ensayos o mediciones: determinación del éxito o fracaso del estudio; contar la cantidad de éxitos o fracasos obtenidos en n ensayos.

3.1.3. Éxito

Encontrar un rango de resultados de n muestras de THM fuera de la norma. ¿Con cuántos éxitos se puede decir que el evento no es aleatorio?

Por ser un estudio sin antecedentes previos en la zona, se asume una probabilidad de incidencia de los resultados en 0.5 (verdaderamente aleatorio); sin embargo, se hace el análisis para una probabilidad de incidencia de 0.7 con meros fines comparativos y demostrativos, a manera de plasmar la variabilidad de los n resultados exitosos que validarían los resultados obtenidos, obteniendo número de éxitos necesarios para cada caso probabilístico:

$$P = 0.5$$

$$n = 8$$

$$e = 1$$

Tabla VIII. **Número de éxitos en casos probabilísticos**

P = 0.7 n = 8 e = 3	P = 0.7 n = 7 e = 2	P = 0.5 n = 8 e = 1
Para una probabilidad de éxito de 0.7 con 8 muestras, se deben obtener más de tres pruebas de éxito para determinar que el experimento no es aleatorio.	Para una probabilidad de éxito de 0.7 con 7 muestras, se deben obtener más de dos pruebas de éxito para determinar que el experimento no es aleatorio.	Para una probabilidad de éxito de 0.5 con 8 muestras, se debe de obtener más de una prueba de éxito para determinar que el experimento no es aleatorio.

Fuente: elaboración propia.

Entonces:

$$H_0: P = 0.5$$

$$H_a: P > 0.5$$

Donde:

Ho: significancia establecida para el experimento

Ha: hipótesis nula

Se justifica que 7 u 8 muestras son suficientes para que con dos hallazgos positivos (valores fuera del rango de la norma) se rechace Ho, evidencia de que se está ante una práctica inapropiada.

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

3.2. Standard methods

Según Standard Methods para la evaluación del agua y aguas residuales, (Greenberg, 2002) propone la fórmula siguiente:

$$N \geq \left(\frac{t * s}{U} \right)^2$$

Donde:

N: número de muestras

s: desviación estándar global

t: nivel de confianza (prueba *t student* para un nivel de confianza dado)

U: nivel de incerteza (nivel aceptable de incertidumbre)

Del método 725 THM PLUS se tiene:

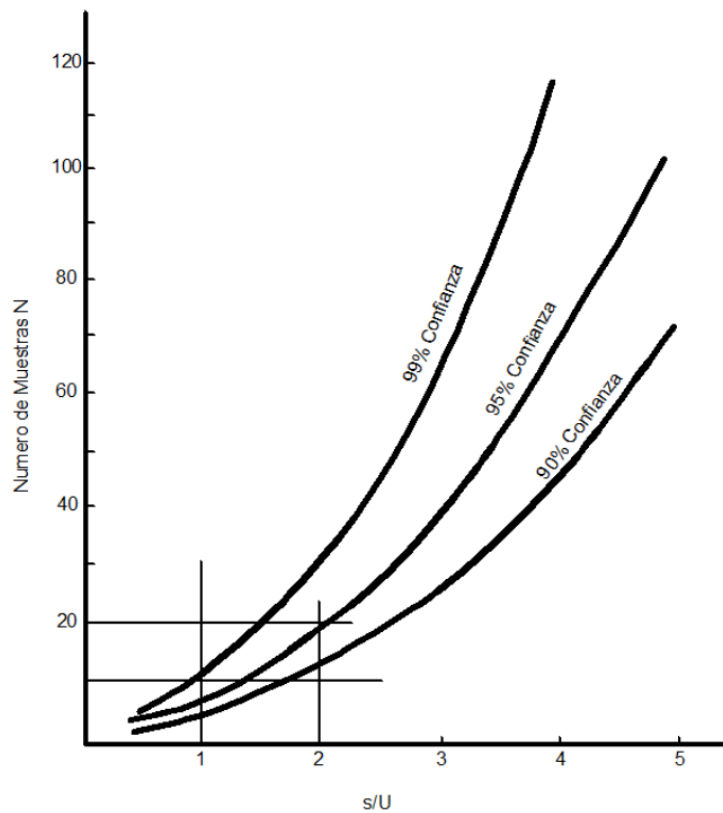
U = 5 mg/L

S = +/- 3 mg/L Según Standard Methods

Y esperando una t de 99 %

Leyendo en la siguiente gráfica, N es aproximadamente 6 muestras.

Figura 1. **Número de muestras**

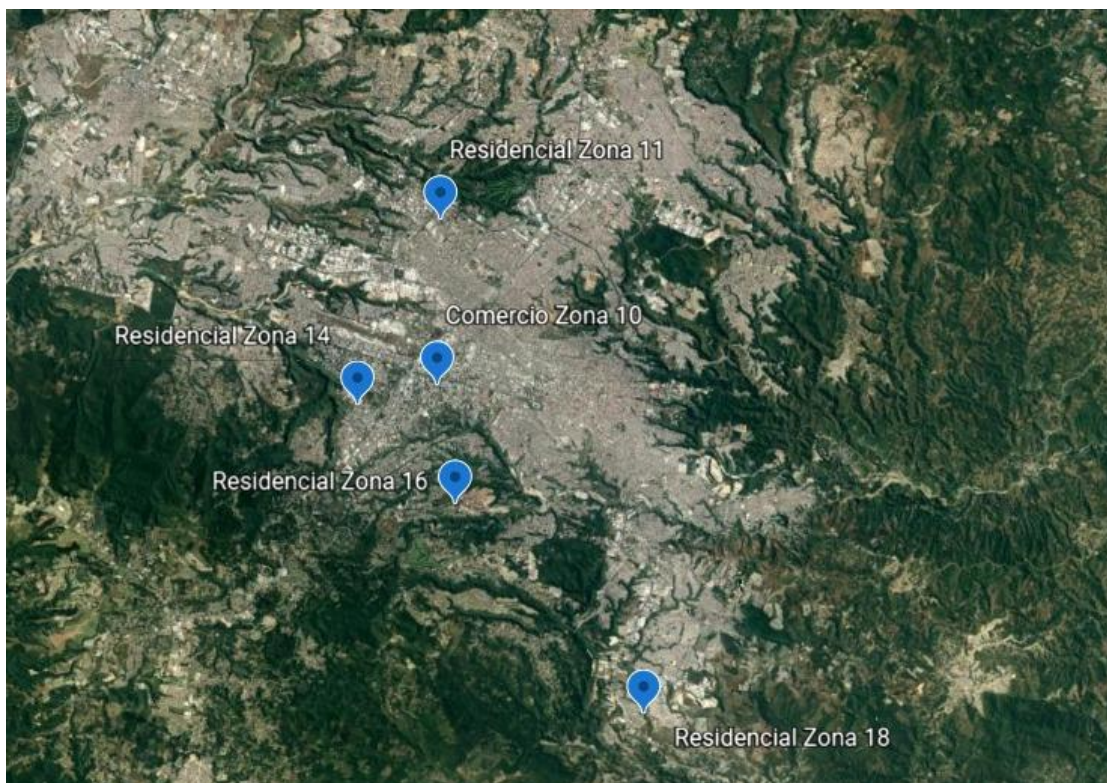


Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.3. Muestreo

A continuación, se presenta la ubicación e información de cada uno de los puntos de muestreo (PTAR evaluadas):

Figura 2. **Ubicación de PTAR evaluadas**



Fuente: Google Earth. Versión 9.140.0.5. Consultado el 10 de diciembre de 2021. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>.

Tabla IX. Información de PTAR evaluadas

Punto de muestreo	
Descripción sistema de tratamiento	Datos
<p>1. Edificio de oficinas "Miraflores": consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (reactor anaeróbico de flujo ascendente), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.</p>	Ubicación: zona 11
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema anaerobio
	Descarga: conectado a colector municipal
	

Continuación de la tabla IX.

Punto de muestreo	
Descripción sistema de tratamiento	Datos
2. Edificio de apartamentos "Cayalá": consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (reactor anaeróbico de flujo ascendente), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.	Ubicación: zona 16
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema anaerobio
	Descarga: conectado a colector municipal



Continuación de la tabla IX.

Punto de muestreo	
Descripción sistema de tratamiento	Datos
3. Centro Comercial "fase 1": consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (tanque de aireación), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.	Ubicación: zona 10
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema aerobio
	Descarga: conectado a colector municipal



Continuación de la tabla IX.

4. Residencial Condominio: consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (tanque de aireación), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.	Ubicación: carretera al Atlántico CA-9 zona 18
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema aerobio
	Descarga: conectado a cuerpo receptor
	

Continuación de la tabla IX.

5. Edificio de apartamentos Mariscal: consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (reactor anaeróbico de flujo ascendente), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.	Ubicación: zona 11, colonia Mariscal
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema anaerobio
	Descarga: conectado a colector municipal



Continuación de la tabla IX.

6. Edificio de apartamentos: consiste en tratamiento preliminar (rejillas y trampa de grasa), tratamiento primario (sedimentador tipo contactor anóxico y desnitrificador), tratamiento secundario (tanque de aireación), sedimentador final, clarificador y sistema de desinfección.	Ubicación: zona 14 La Villa
	Aguas ordinarias
	Tipo de tratamiento: sistema aerobio
	Descarga: conectado a colector municipal
	

Fuente: [Fotografías de Jesús Sobalvarro]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala). Colección particular. Guatemala.

3.3.1. Medición de parámetros

Los parámetros de medición que se incluyeron en el estudio son los siguientes:

- Trihalometanos totales THM
- Potencial de hidrógeno
- Temperatura
- Conductividad eléctrica
- Sólidos disueltos
- Cloro residual

La medición de la concentración de THM se realizó con el espectrofotómetro modelo 1900 DR de HATCH; los parámetros listados del 2 al 5, mediante una sonda multiparamétrica y el cloro residual a través del kit CN-66F disco color para la medición de cloro libre.

3.3.2. Toma de muestras

Las muestras se recolectaron en recipientes con un volumen de 1 galón, trasladándolas a una temperatura de 4 °C, utilizando hielo para refrigerar de acuerdo con el protocolo de toma de muestras de agua residual según lo indica la toma y preservación de muestras del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

3.3.3. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini de Molina de la Escuela

Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Siguiendo el procedimiento planteado del método HATCH 10132: calentamiento indirecto para la determinación de pruebas de potencial formación de THM en muestras de agua potable (febrero de 2020).

3.3.4. Material y equipo

Los materiales y equipo necesarios para el estudio se presentan a continuación:

Tabla X. **Listado de materiales y equipo**

Materiales	Equipo
<ul style="list-style-type: none"> • Tubo de ensayo con tapón de rosca. 	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotómetro DR Hach 1900, programa 725 THM Plus, medido en CHCl_3, (ppb).
<ul style="list-style-type: none"> • Celdas capacidad de 50 cms³ con rosca. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenciómetro.
<ul style="list-style-type: none"> • Pipetas volumétricas de diferentes capacidades (1 cm³, 5 cms³, 10 cms³). 	<ul style="list-style-type: none"> • Conductímetro
<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kit para prueba de cloro libre y residual campana de absorción
<ul style="list-style-type: none"> • Succionador de pipeta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estufa
<ul style="list-style-type: none"> • Gradillas 	

Fuente: elaboración propia.

3.3.5. Reactivos utilizados para la medición

A continuación, se describen los reactivos utilizados en los análisis de laboratorio realizados:

- THM *plus reagent 1 (base/dechlorinator solution)*
- THM *plus reagent 2* (Nikethamide (56-26-7), (100 %), N, N-diethylnicotinamide (56-26-7) (100 %).
- THM Plus Reagent 3 (sulfuric acid (7664-93-9) y phosphoric acid (7664-32-2).
- THM *plus reagent 4 (reactif indicateur)*

3.4. Valores de THM normados

Pese a que actualmente en Guatemala no se tienen establecidos niveles normados para los trihalometanos totales (THM) en las descargas de agua residual, que son la base de este estudio, la norma técnica guatemalteca NTG Coguanor 29001, cita en su primera publicación, 200 µg/l como límite máximo permitido para las aguas de consumo humano.

En la publicación de la Agencia de la Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) en la actualización de la fase 2 (2009) para la desinfección y subproductos de la desinfección, se hace referencia a que el nivel aceptado para los trihalometanos totales (THM's) queda en 0.08 mg/l (80 µg/l) que es el

dato en el cual se basará el estudio para la identificación y determinación de los niveles obtenidos en las muestras caracterizadas.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en laboratorio de cada una de los muestreos; estos fueron tabulados en hojas electrónicas y gráficas, con el apoyo de los programas Excel y Word.

4.1. Cloro residual

En la siguiente tabla se presentan los resultados de cloro residual de todos los muestreos para cada planta. Como se puede observar, los valores a la entrada son más bajos que a la salida en todas las plantas, debido al sistema de desinfección de las aguas residuales. La mayor diferencia es en la planta residencial zona 14, con valores promedio de 3.0 a la salida y 0.3 a la entrada; por el contrario, la menor diferencia es en la planta residencial zona 16, con valores promedio de 0.74 a la salida y 0.34 a la entrada.

Tabla XI. **Resultados de cloro residual**

Medición de cloro residual							
Planta evaluada	Punto de muestreo	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Promedio
Oficinas zona 11	Entrada	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.42
	Salida	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.20
Residencial zona 16	Entrada	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.34
	Salida	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.70
Centro Comercial Z.10	Entrada	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
	Salida	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00
Residencial zona 18	Entrada		0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
	Salida		1.5	1.5	1.5	1.5	1.50

Continuación de la tabla XI.

Residencial zona 11	Entrada	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
	Salida	3.0	3.0	1.5	3.0	1.5	2.40
Residencial zona 14	Entrada	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
	Salida	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.00

Fuente: elaboración propia.

4.2. **Parámetros fisicoquímicos**

A continuación, se presentan los resultados promedio de los parámetros físicos evaluados para cada planta, con muestras tomadas a la salida del sistema.

Tabla XII. **Resultados de parámetros fisicoquímicos**

Parámetro	Unidad de medida	Punto de muestreo					
		Oficinas zona 11	Residencial zona 11	Residencial zona 18	Residencial zona 14	Residencial zona 16	Centro Comercial zona 10
Potencial de Hidrógeno	Unidades de pH	7.6	6.7	7.0	6.3	5.8	6.2
Conductividad eléctrica	µs/cm	1153	726	760	525	324	487
Sólidos suspendidos totales	(mg/L)	576,5	363	380	262,5	162	243
Temperatura	°C	22	20	20	19	21	22
Turbiedad	(mg/L)	205	151	90	14	67	10
DQO	(mg/L)	552	221	155	12	170	99
DBO ₅	(mg/L)	298.4	49.5	42.5	8	104	52.4
Nitrógeno total	(mg/L)	128	62	55	31	18	24
Fósforo total	(mg/L)	36.9	14.9	15.4	15.5	10.5	7.9

Fuente: elaboración propia.

4.3. Trihalometanos

En la siguiente tabla se presentan los resultados por muestreo y promedio de los trihalometanos para cada planta. El valor más alto es en la planta de oficinas zona 11, con valor promedio de 376.2 µg/L; por el contrario, el valor más bajo es en la planta del centro comercial Z.10, con valor promedio de 74.4 µg/L.

De acuerdo con los resultados promedio de trihalometanos (ver tabla XIV), únicamente la planta de centro comercial zona 10, cumple con los límites de la US-EPA.

Tabla XIII. **Resultados de trihalometanos**

Muestreo	THM (µg/L)					
	Punto de muestreo					
	No.	Oficinas zona 11	Residencial zona 11	Residencial zona 18	Residencial zona 14	Residencial zona 16
1	367	150	142	72	269	100
2	324	160	141	171	240	91
3	332	142	171	84	211	71
4	395	141	164	79	191	47
5	463	159	161	72	193	87
Valor promedio	376.2	150.2	154.4	94.6	216.8	74.4

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Valores de trihalometanos normados de calidad de agua para consumo humano**

Parámetro	Valor normado		
	OMS LMP	US-EPA LMP	UE LMP
Trihalometanos totales µg/L	200	80	-

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la tabla anterior, las normas internacionales para el agua UE, no hacen referencia a los trihalometanos totales.

4.4. Relaciones entre parámetros

A continuación, se presentan las relaciones entre los parámetros: promedio THM, turbiedad, DBO, nitrógeno, pH, temperatura y sólidos suspendidos totales para cada planta.

Tabla XV. **Parámetros por relacionar**

Parámetro / Muestra	Oficinas Z.11	Residencial Z. 11	Residencial Z.18	Residencial Z. 14	Residencial Z. 16	Centro Comercial Z. 10
Promedio TTHM ($\mu\text{g/l}$)	376.2	150.4	155.8	95.6	220.8	79.2
Turbiedad (mg/l)	205	151	90	14	67	10
DBO (mg/l)	298.4	49.5	42.5	8	104	52.4
Nitrógeno (mg/l)	128	62	55	31	18	24
Ph	7.6	6.7	7	6.3	5.8	6.2
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	22	20	20	19	21	22
SST (mg/l)	576.5	363	380	262.5	162	243

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Gráficas

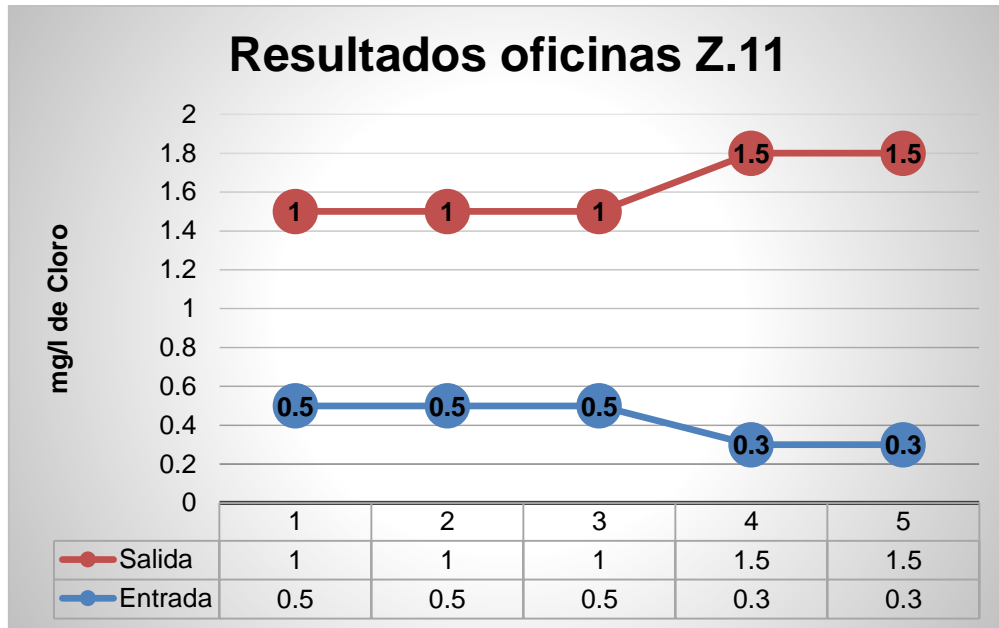
De acuerdo con los resultados de los análisis de las muestras de agua residual, se elaboraron las gráficas de cloro residual, comparación límites US-EPA y valores promedio THM, relaciones entre parámetros.

5.1.1. Cloro residual

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados de cloro residual a la entrada y salida de cada planta.

- Planta oficinas zona 11: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio, sí se está llevando a cabo. En la figura siguiente se observa que los valores más altos a la salida (1.5 mg/L) corresponden a los muestreos 4 y 5; los valores más altos a la entrada (0.5 mg/L), corresponden a los muestreos 1, 2 y 3.

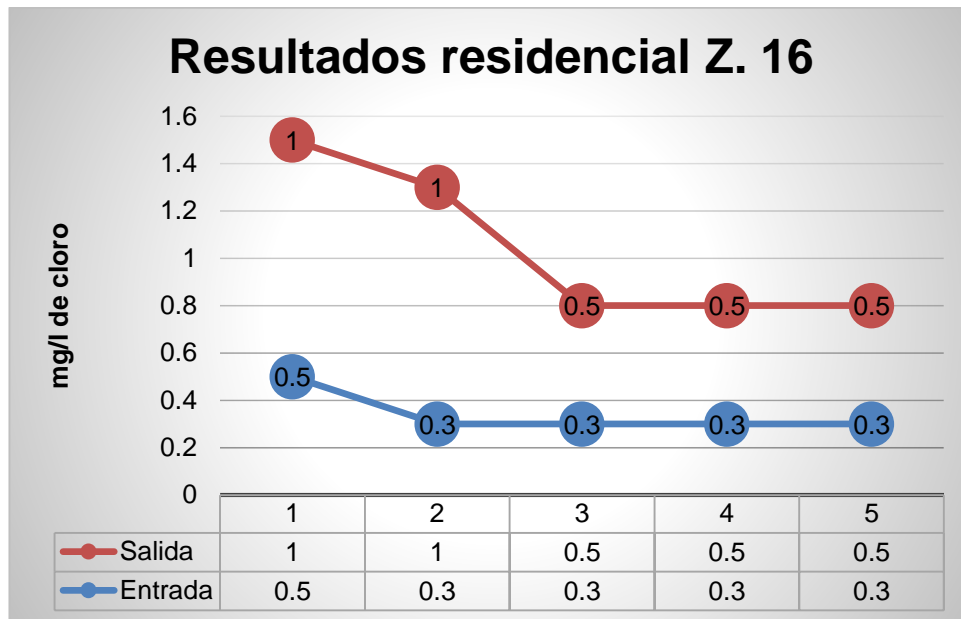
Figura 3. **Medición de cloro residual entrada – salida oficinas zona 11**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 16: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio, sí se está llevando a cabo. En la siguiente figura se observa que los valores más altos de cloro residual a la salida (1.0 mg/L) corresponden a los muestreos 1, 2 y 3; el valor más alto a la entrada (0.5 mg/L), corresponde al muestreo 1.

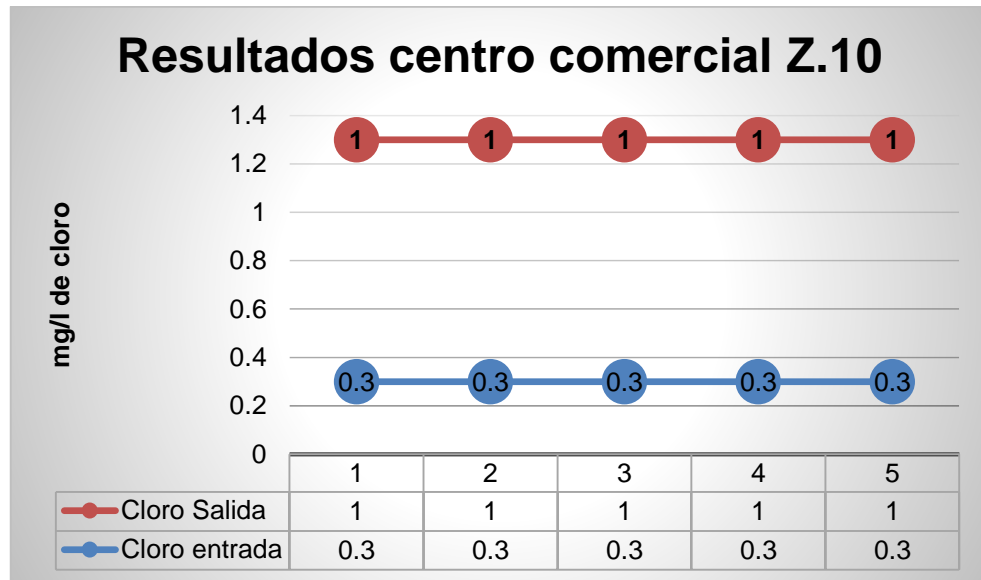
Figura 4. **Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 16**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta centro comercial zona 10: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio, sí se está llevando a cabo. En la figura 8 se observa que todos los valores de cloro residual a la salida (1.0 mg/L), y todos los valores a la entrada son iguales (0.3 mg/L).

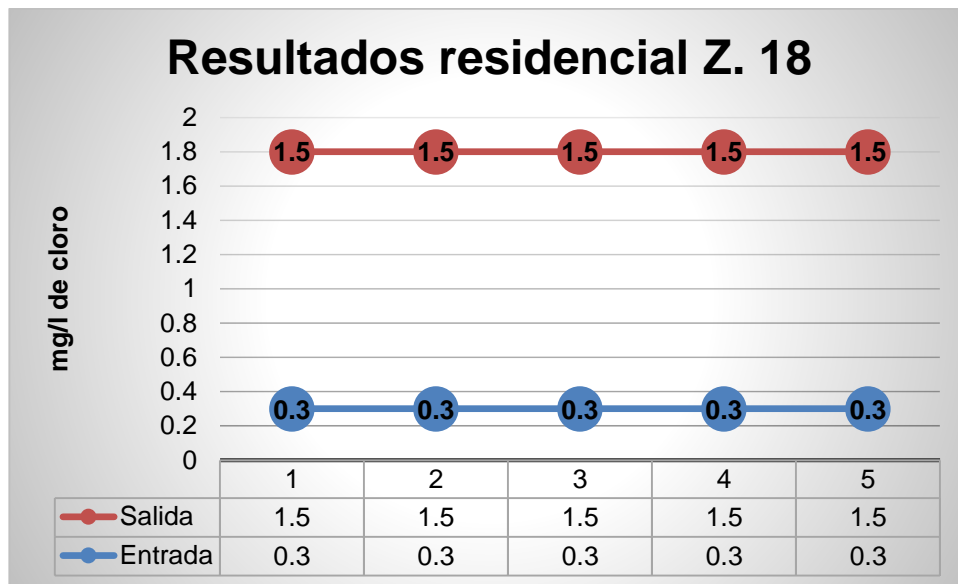
Figura 5. **Medición de cloro residual entrada – salida centro comercial Z.10**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 18: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio, sí se está llevando a cabo. En la figura 9 se observa que todos los valores de cloro residual a la salida (1.5 mg/L), y todos los valores a la entrada son iguales (0.5 mg/L).

Figura 6. **Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 18**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 11: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio sí se está llevando a cabo. En la figura 10 se observa que los valores más altos de cloro residual a la salida (3.0 mg/L) corresponden a los muestreos 1, 2 y 4, y todos los valores a la entrada son iguales (0.5 mg/L).

Figura 7. **Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 11**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 14: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los valores de cloro residual a la salida son mayores que a la entrada en todos los muestreos; con ello se confirma que el proceso de desinfección y aportación de cloro para el objeto de este estudio sí se está llevando a cabo. En la figura 11 se observa que todos los valores de cloro residual a la salida (3.0 mg/L), y todos los valores a la entrada son iguales (0.3 mg/L).

Figura 8. **Medición de cloro residual entrada – salida residencial zona 14**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

5.1.2. Comparación entre límites US-EPA y valores promedio THM

A continuación, se presentan las gráficas donde se comparan los resultados de los límites US-EPA y valores de cada muestreo, así como los límites US-EPA y valores promedio THM para cada planta.

- Planta oficinas zona 11: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM son mayores que los límites US-EPA en todos los muestreos (ver figura 12).

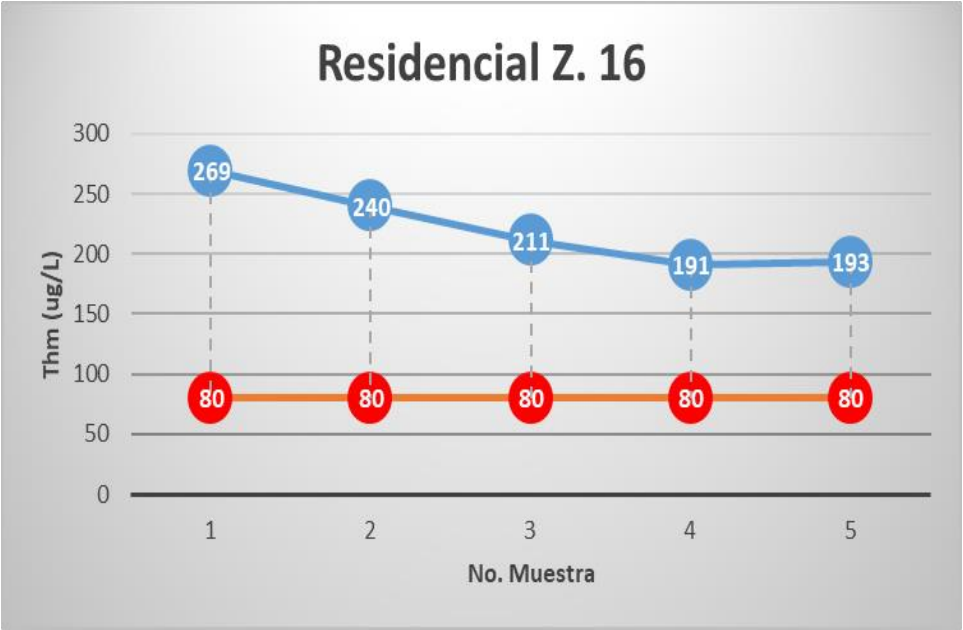
Figura 9. Comparación entre THM y límites US-EPA, oficinas zona 11



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 16: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM son mayores que los límites US-EPA en todos los muestreos (ver figura 13).

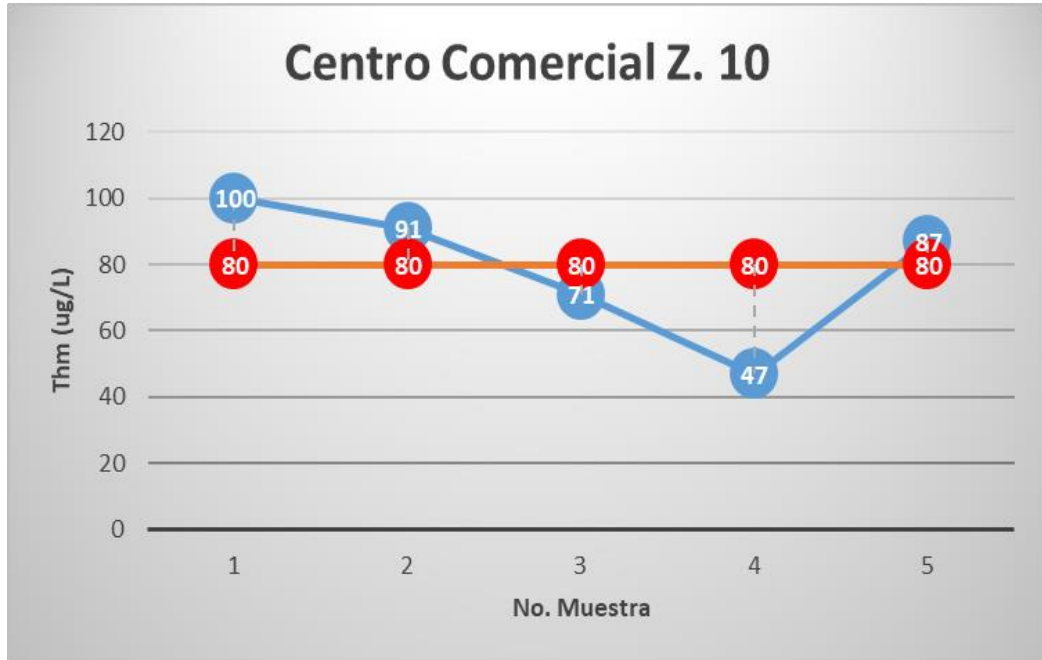
Figura 10. **Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 16**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta centro comercial zona 10: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM de los muestreos 1, 2 y 5 son mayores que los límites US-EPA; los resultados promedio THM de los muestreos 3 y 4 son menores que los límites US-EPA (ver figura 14).

Figura 11. **Comparación entre THM y límites US-EPA, centro comercial zona 10**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 18: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM son mayores que los límites US-EPA en todos los muestreos (ver figura 15).

Figura 12. **Comparación entre THM y límites US-EPA, residencial zona 18**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 11: de acuerdo con el sistema de tratamiento (aerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM son mayores que los límites US-EPA en todos los muestreos (ver figura 16).

Figura 13. **Comparación entre THM y límites US-EPA residencial zona 11**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Planta residencial zona 14: de acuerdo con el sistema de tratamiento (anaerobio) y desinfección (uso de tricloro), los resultados promedio THM de los muestreos 2 y 3 son mayores que los límites US-EPA; los resultados promedio THM de los muestreos 1, 4 y 5 son menores que los límites US-EPA (ver figura 17).

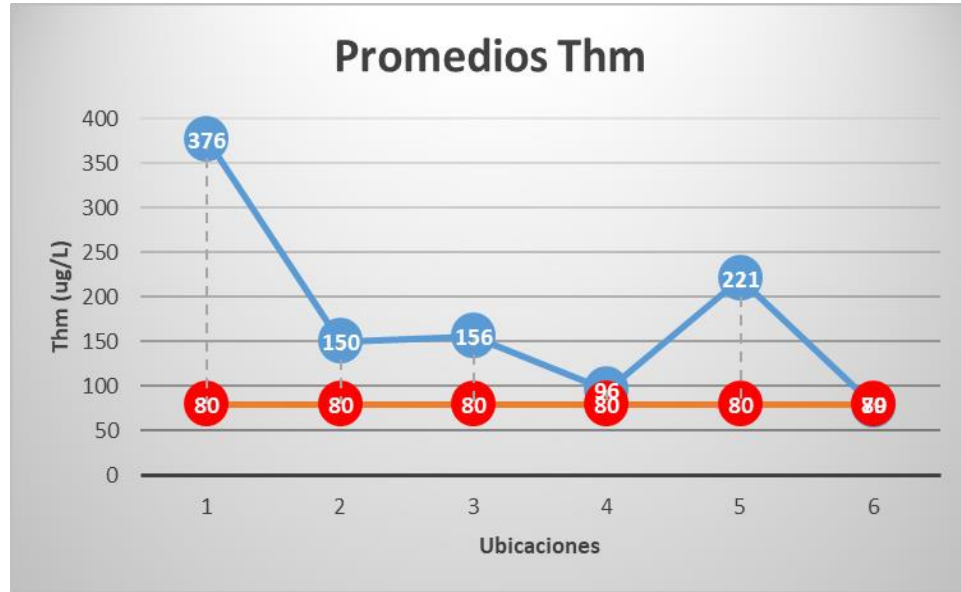
Figura 14. **Comparación entre THM y límites US-EPA residencial zona 14**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Considerando los resultados promedio de THM de cada planta, únicamente la del centro comercial zona 10 (74 $\mu\text{g/L}$) cumple con los límites US-EPA (ver figura 19).

Figura 15. **Comparación entre THM_{promedio} y límites US-EPA, en todos los muestreos**



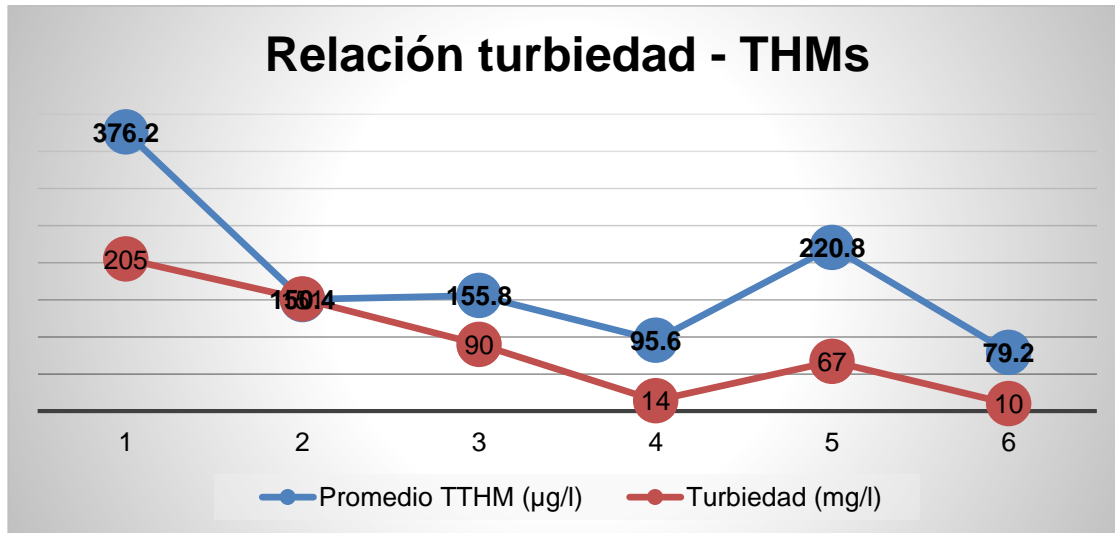
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

5.1.3. Relaciones entre parámetros

A continuación, se presentan las gráficas donde se muestran las relaciones entre los parámetros: promedio THM con respecto a los parámetros turbiedad, DBO, nitrógeno, pH, temperatura y sólidos suspendidos totales para cada planta. También se incluyen las gráficas y ecuaciones de correlación para cada uno de los parámetros evaluados.

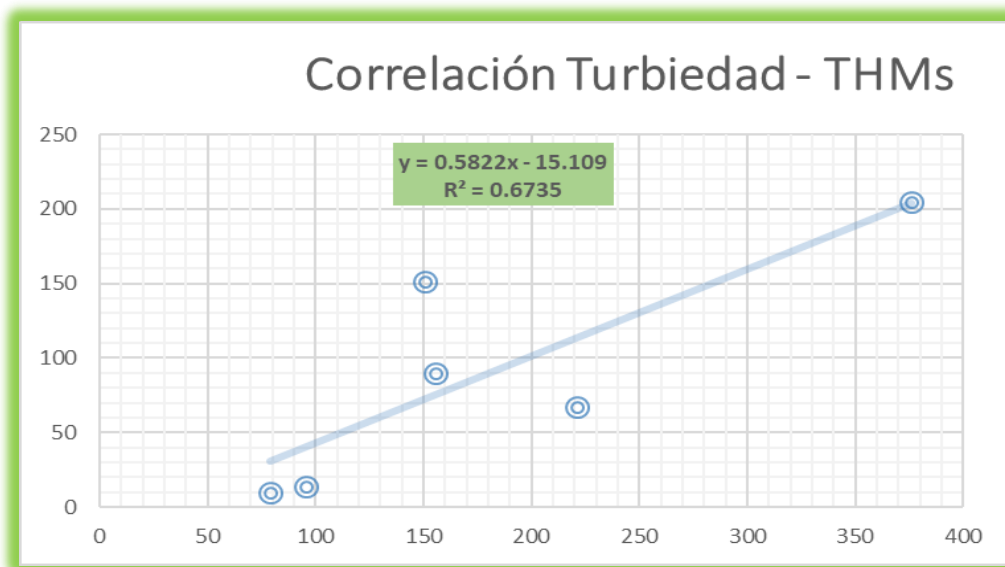
- Relación turbiedad-THM: de acuerdo con los resultados, los valores promedio de THM son mayores que los valores de turbiedad en todas las plantas; el valor de la correlación entre estos parámetros es 0,6735 (ver figuras 19 y 20).

Figura 16. Relación turbiedad - THMs



Fuente: elaboración propia.

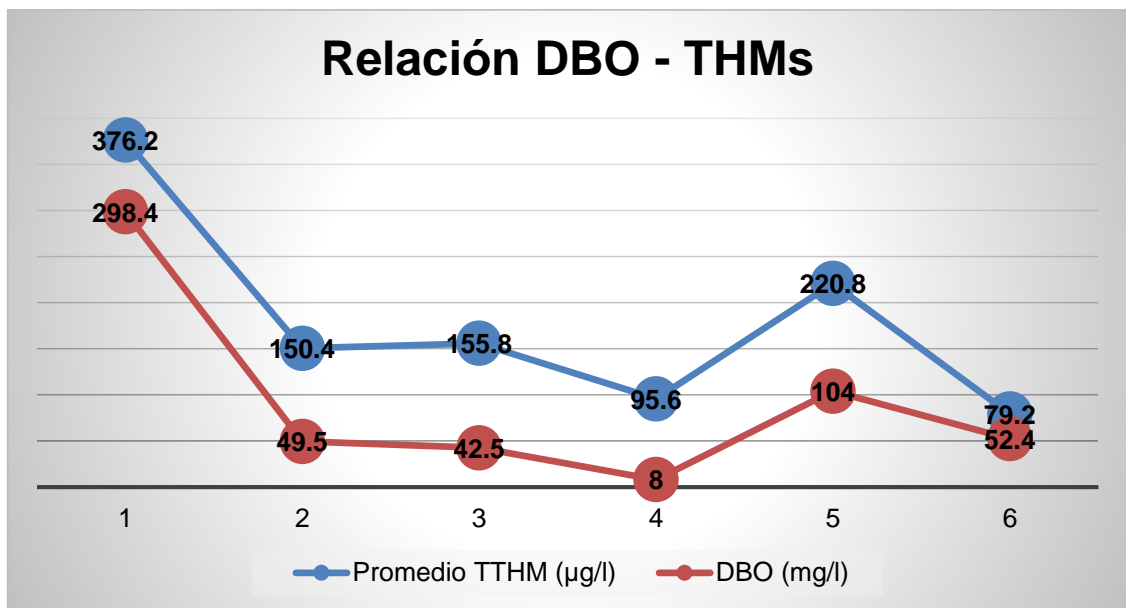
Figura 17. Correlación turbiedad - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

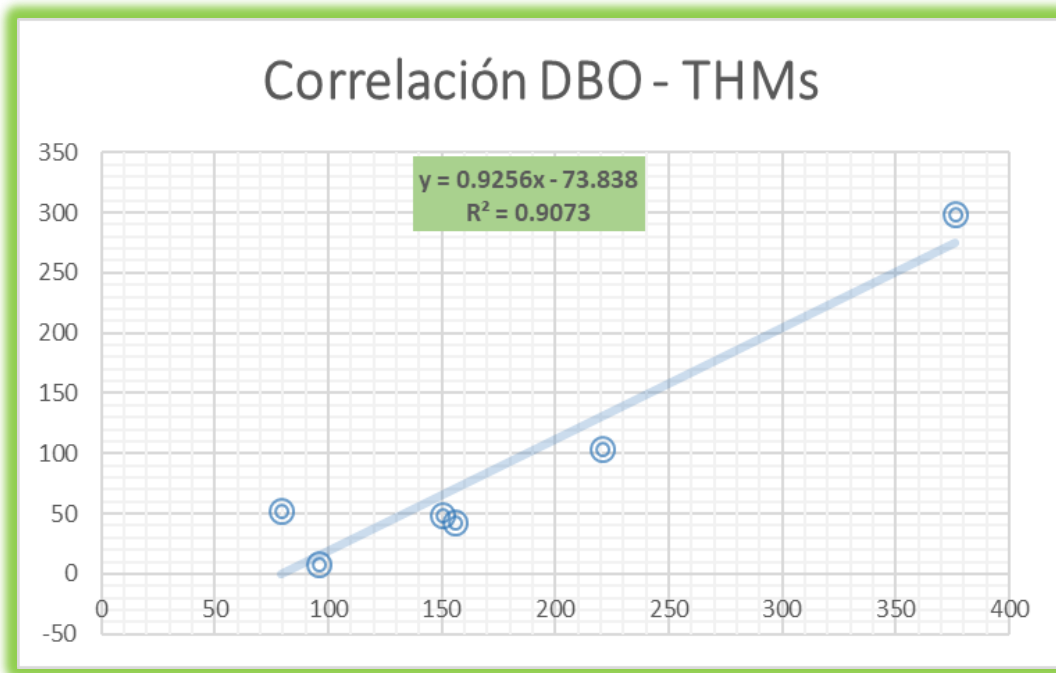
- Relación DBO-THM: de acuerdo con los resultados, los valores promedio de THM son mayores que los de DBO en todas las plantas; el valor de la correlación entre estos parámetros es 0,9073 (ver figuras 21 y 22).

Figura 18. Relación DBO - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

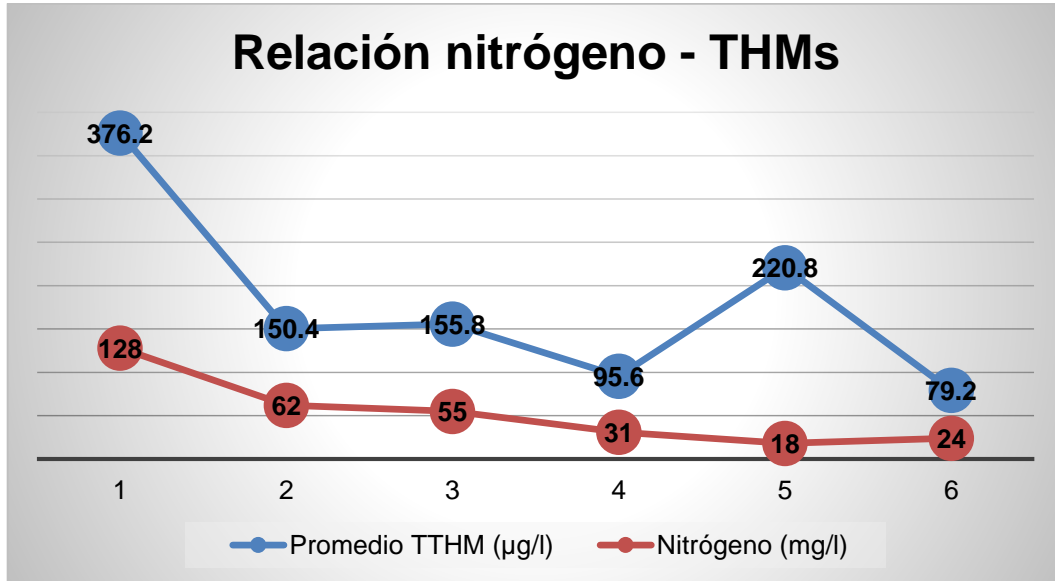
Figura 19. **Correlación DBO – THMs**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

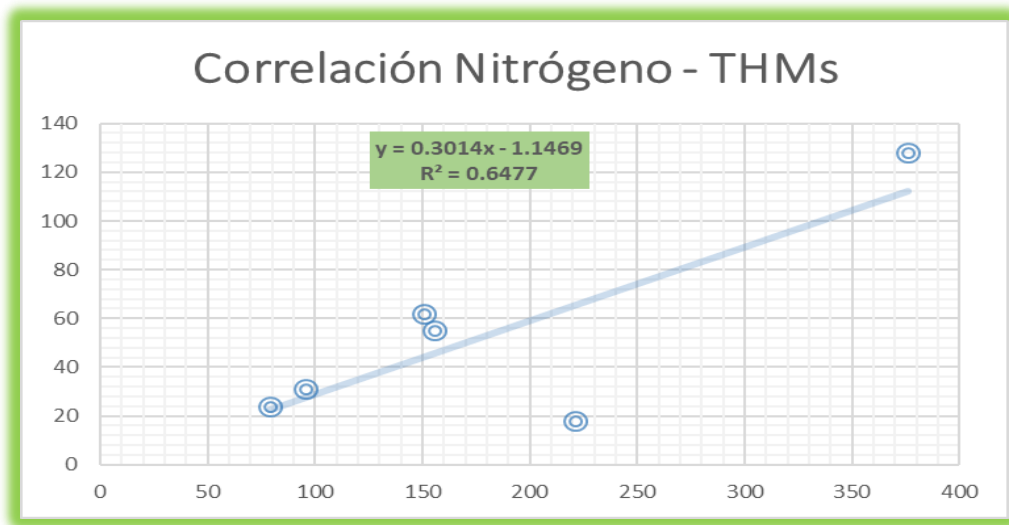
- Relación nitrógeno-THM: de acuerdo con los resultados, los valores promedio de THM son mayores que los de nitrógeno en todas las plantas; el valor de la correlación entre estos parámetros es de 0,6477 (ver figuras 23 y 24).

Figura 20. Relación nitrógeno - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

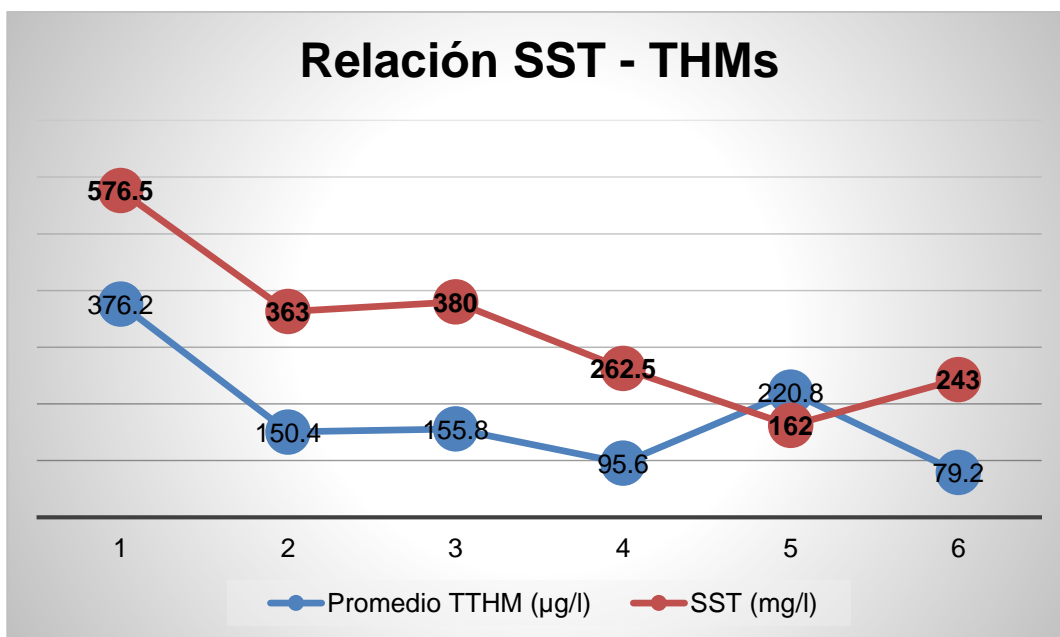
Figura 21. Correlación nitrógeno - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

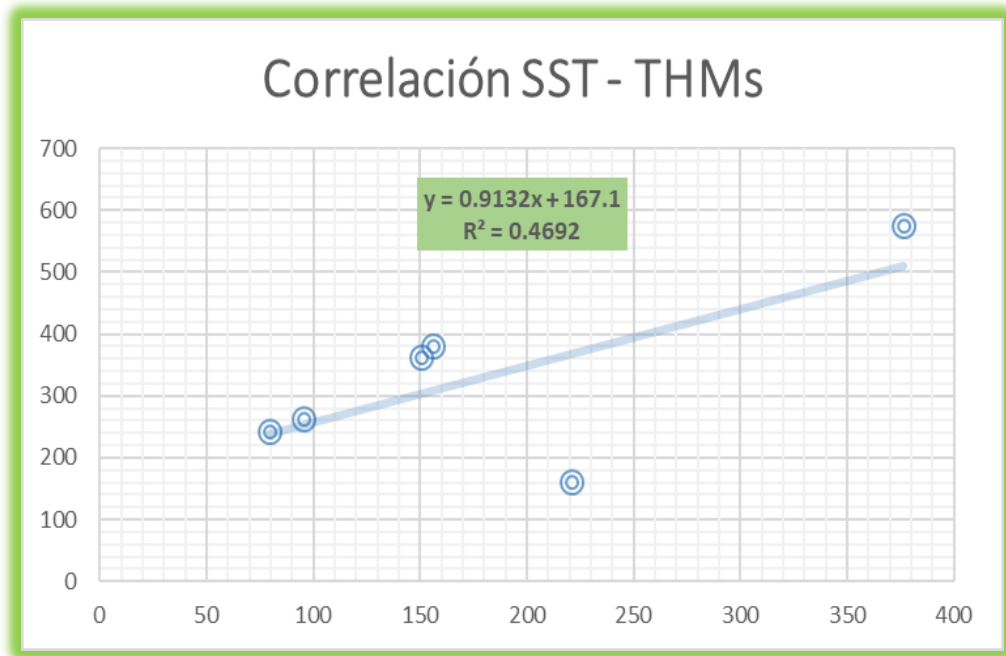
- Relación SST-THM: de acuerdo con los resultados promedio de THM de cada planta, únicamente la planta residencial zona 16 presenta valor de SST (162 mg/L), más bajo que los THM (216 µg/L); el valor de la correlación entre estos parámetros es 0,4692 (ver figuras 25 y 26).

Figura 22. Relación SST - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

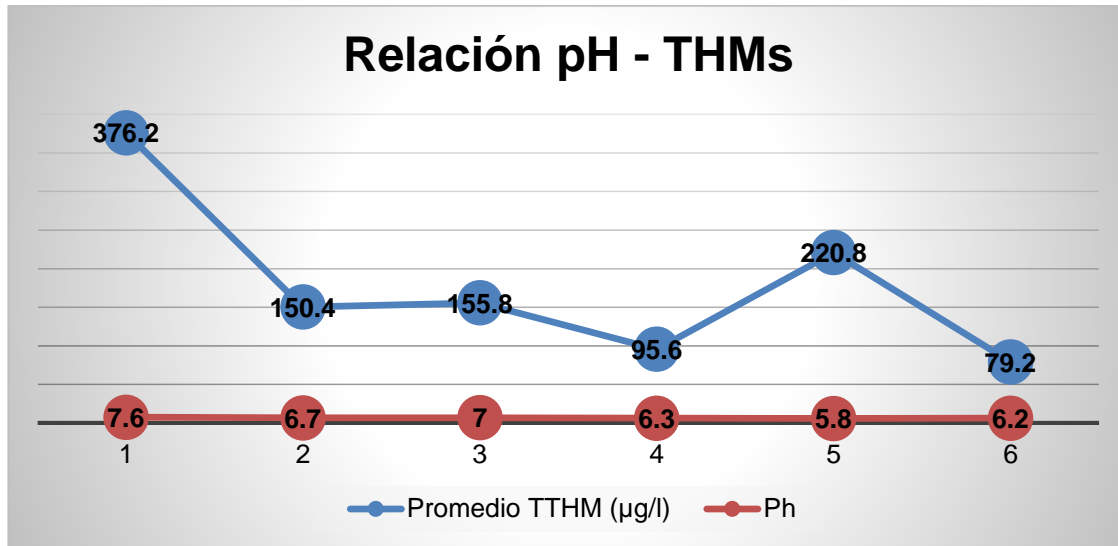
Figura 23. **Correlación SST – THMs**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

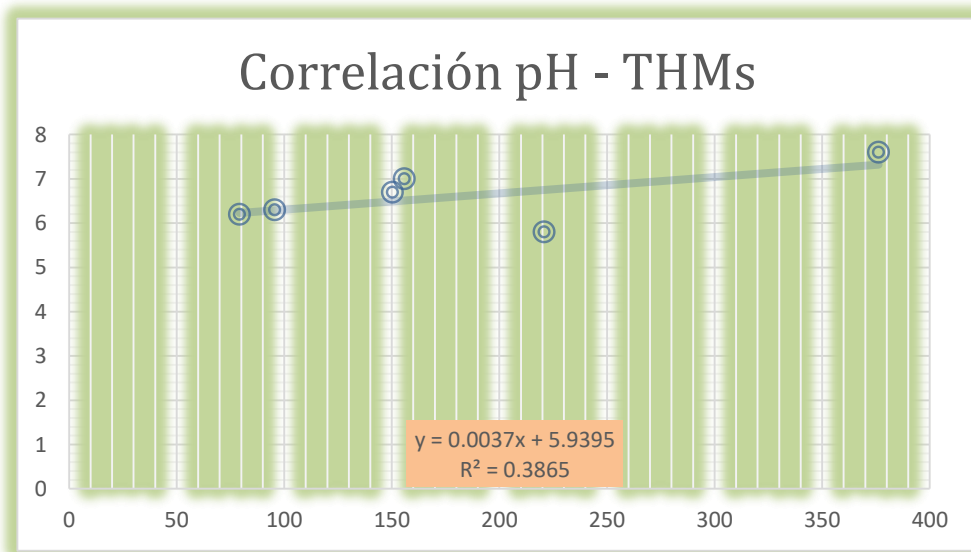
- Relación pH-THM: de acuerdo con los resultados, los valores promedio de THM son mayores que los de pH en todas las plantas; el valor de la correlación entre estos parámetros es de 0,3865 (ver figuras 27 y 28).

Figura 24. Relación pH - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

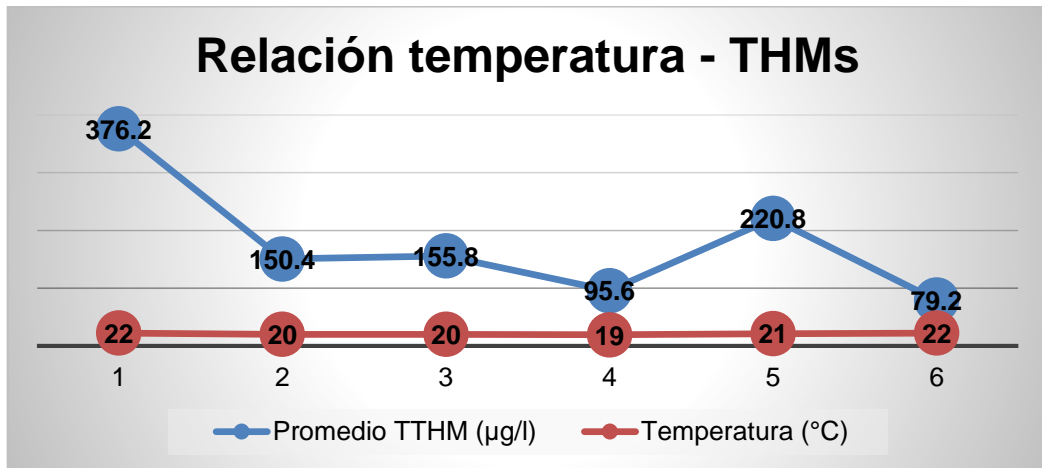
Figura 25. Correlación pH - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

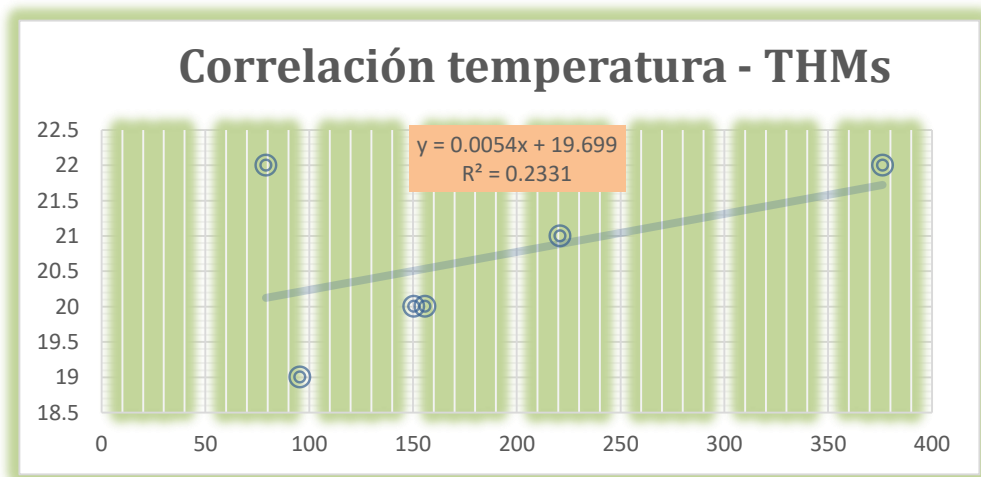
- Relación temperatura-THM: de acuerdo con los resultados, los valores promedio de THM son mayores que los de pH en todas las plantas; el valor de la correlación entre estos parámetros es 0,2331 (ver figuras 30 y 31).

Figura 26. Relación temperatura - THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 27. Correlación temperatura – THMs



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

5.2. Análisis de resultados

De un total de 30 muestras realizadas, posterior al tratamiento de cada punto estudiado y con las condiciones que se caracterizaron en cada uno, el 83 % del lote genera THM's por encima de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos. Esto demuestra una oportunidad de grandes magnitudes para controlar las descargas de dichos efluentes y que estas no perjudiquen en la fase siguiente a cada elemento de tratamiento.

Como se observa en las figuras 6 a la 11, el cloro sí está siendo aplicado justo en el proceso final del tratamiento, tratamiento terciario; lo que indica que, el afluente no manifiesta presencia de cloro residual derivado de la dosificación del abastecimiento del agua potable y que, la concentración mayor está justo en el punto de la descarga. De acuerdo con estas gráficas se puede aseverar que todas las muestras contenían cloro, lo que garantiza que los trihalometanos fueron generados por la aplicación del tricloro, utilizado en el presente estudio.

También, de acuerdo con los resultados, se tiene una considerable disminución en niveles de trihalometanos, cuando estos tuvieron un tiempo de contacto y no fueron expuestos a ello. Por lo que se puede indicar que, es necesario, si la desinfección se hiciera por medio de cloro en cualquiera de sus presentaciones, que se tenga el compartimiento para obligar al efluente a pasar por dicho elemento.

Al momento de realizar relaciones de los parámetros estudiados, los cuales fueron 6 en total, en el 33 % de los mismos se observó que cuentan con un vínculo de interés, ya que su comportamiento es similar, tanto si este aumenta o disminuye. En este orden de ideas, los que tienen afinidad con materia orgánica,

son el DBO₅, los sólidos suspendidos y la turbiedad, que dan indicios de que con ellos sí se generan los subproductos. Siendo así, el estudio de la generación de subproductos de la cloración en aguas residuales enfocados en trihalometanos no tendrá que detenerse; más bien se deberá continuar con las pruebas y relaciones de los indicios hallados en esta investigación.

Con el nitrógeno se pueden hacer aportes importantes, ya que este, al ser de baja remoción en los sistemas de tratamiento anaerobio, presenta señales de que, dependiendo la tecnología que se tenga en el sistema de tratamiento de agua residual, podrá ser vestigio de su generación o presencia en la descarga de dicho efluente.

Por el contrario, se observa qué parámetros se pueden analizar en campo con pruebas rápidas para validar la presencia y generación de los trihalometanos en aguas residuales, como la temperatura y el pH. Con la temperatura no se observa ninguna dependencia, ya que se comportan de manera independiente. Con el pH, contrario a los resultados del trabajo realizado por el Ing. Álvaro Ramírez, quien estudió el comportamiento y la generación de trihalometanos en agua de consumo humano en plantas de tratamiento de agua potable, y encontró vinculación entre ambos parámetros, en agua residual no se ve coherencia lógica para comprobar dicha conducta.

Para finalizar y con base en las correlaciones realizadas con cada parámetro en relación con los trihalometanos obtenidos, se puede indicar que el que mayor relación y con quien se puede asociar de una manera más cercana a la producción de dichos organoclorados es la DBO₅, ya que su valor R cuadrado es el que más se acerca a 1 (0,9073), en comparación con los otros parámetros y sus valores de R cuadrado.

5.3. Método de desinfección en las plantas evaluadas

Las plantas de tratamiento evaluadas cuentan con un proceso de desinfección con cloro, principalmente por aspectos económicos y técnicos, mejoran la calidad del agua y permiten cumplir con lo indicado en el *Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*.

El uso de cloro como medio de desinfección para aguas residuales presenta ventajas y desventajas, al compararlo con otras tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, como la luz ultravioleta (UV) y el ozono (O₃). En la actualidad la tendencia de las estrategias de desinfección del agua es la combinación de métodos.

Tabla XVI. Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con cloro

Método de desinfección	Factor
Cloro	pH del agua: cuanto mayor es el pH del agua, este compuesto tiende a ionizarse y el equilibrio de la reacción se desplaza hacia la formación de ion hipoclorito, cuyo potencial redox es menor y la acción germicida es mucho más lenta.
	Temperatura: a mayor temperatura, mayor es la acción desinfectante del cloro, pero a su vez es más inestable y se evapora con mayor rapidez.
	Tiempo de contacto: es un factor muy importante en el proceso de cloración. El tiempo mínimo de contacto debe ser de 30 minutos.
	Características de los organismos: algunos microorganismos parecen aumentar su resistencia al ser sometidos a procesos con altas tasas de inactivación, mientras otros la disminuyen, por lo que hay mucha controversia al respecto.

Continuación de la tabla XVI.

Método de desinfección	Asociación de los microorganismos: uno de los factores más importantes es el tamaño de los microorganismos y su forma de asociación.
Cloro	Otras consideraciones: el cloro libre que queda en el agua, diferentes sustancias pueden reaccionar con cloro en el proceso de desinfección del agua para producir subproductos de desinfección.

Fuente: elaboración propia.

La luz ultravioleta (UV) es un método de desinfección efectivo, no utiliza productos químicos para la inactivación de los microorganismos patógenos y no genera subproductos en el tratamiento de aguas residuales. Se basa en la transferencia de energía electromagnética desde una fuente (lámpara UV) al material genético de un microorganismo (ARN y ADN).

La efectividad de la desinfección UV depende de factores como el tiempo de contacto, la intensidad de la luz UV, el grosor del líquido, la absorbancia del agua residual, la turbidez, la configuración del sistema y la temperatura.

En el estudio de Acevedo Moraga (2015), los resultados de la desinfección con cloro registraron valores más bajos de coliformes en comparación con la luz UV, consiguiendo estar dentro de los rangos requeridos de calidad bacteriológica para aguas destinadas a reuso en la agricultura, según EPA. En relación con los colifagos somáticos, se determinó que la mayor eficiencia de eliminación de colifagos se logró con la luz UV, en comparación con la desinfección con cloro.

Tabla XVII. **Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con luz ultravioleta**

Método de desinfección	Factor
Luz ultravioleta (UV)	Propiedades hidráulicas del reactor: para lograr una máxima exposición a la radiación UV; este sistema de desinfección debe tener un flujo uniforme, debido a que la trayectoria que sigue un organismo dentro del reactor es determinante para la desactivación del mismo.
	Intensidad de la radiación UV: depende de factores como el recubrimiento de las lámparas UV con suciedad, el tiempo de operación de la lámpara UV, la configuración y ubicación en el reactor. El recubrimiento de las lámparas depende de la dureza, alcalinidad, temperatura de la lámpara, pH y la concentración de calcio y hierro. El color del agua y la turbidez, también son factores que hacen variar la efectividad de la radiación UV. Estos problemas pueden minimizarse con la limpieza, actividades de operación y mantención apropiadas.
	Características del agua residual: de acuerdo con los constituyentes puede haber distintos efectos en la desinfección UV. Uno de los mayores problemas en la desinfección UV es la variación observada en la absorbancia (o transmitancia).
	Otras consideraciones: la desinfección UV no cambia significativamente la calidad del agua y no existe residual de desinfectante en comparación con desinfectantes químicos a base de cloro. Es por esto último que el cloro y cloraminas son con frecuencia utilizados, seguidos por la desinfección UV, para proporcionar un residual de desinfectante.
	El proceso de desinfección UV es efectivo para la eliminación de <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> . El pH, COT (carbono orgánico total) y turbidez, no se ven mayoritariamente afectados; tampoco se ha observado corrosividad y formación potencial de DBPs, debido a que es un proceso físico.
	La tecnología es relativamente económica en comparación con otras opciones de desinfección, es relativamente fácil de operar, ya que no se necesitan químicos; esto lo hace más amigable con el medio ambiente, y sus tiempos de contacto están en el rango de unos pocos segundos, siendo una desinfección rápida.

Fuente: elaboración propia.

El ozono (O_3) es un poderoso agente oxidante usado como desinfectante. Carreón (2009) señala que el ozono es un agente germicida de varios microorganismos; es más eficaz que el cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.

El tratamiento con ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; el método se utiliza en plantas de tamaño mediano o grande, una vez que el agua residual haya recibido por lo menos tratamiento secundario.

También determinó Carreón (2009) que los niveles de trihalometanos detectados en las aguas residuales desinfectadas se encontraron por debajo de los límites establecidos por la legislación mexicana actual de ($200 \mu\text{m/L}$), para el agua potable de consumo público NOM-127-SSA1-1994.

Además, el ozono aplicado en el tratamiento de agua residual puede disminuir la formación de sustancias precursoras que dan origen a la formación de THM's; con la aplicación de ozono se puede lograr una disminución del 7 % en la formación de estos compuestos.

Tabla XVIII. **Factores que condicionan el proceso de desinfección de aguas residuales con ozono**

Método de desinfección	Factor
Ozono	El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias, utiliza un período corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).
	No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente. El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
	El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo cual se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
	El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno, o carbono orgánico total.
	El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se comprueba la hipótesis de que si se generan Trihalometanos Totales (THM's) debido a la cloración del agua residual en el proceso de desinfección en plantas de tratamiento de agua residual, para el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 en niveles mayores al permitido por la OMS, el cual corresponde a 200 µg/L.
2. Los niveles de trihalometanos totales posterior a los sistemas de tratamiento de agua luego de su proceso de desinfección por medio de cloro (tricloro), tomando como base el promedio final del conjunto de muestras, sobrepasan el límite establecido por la US. EPA (80 µg/l).
3. En la planta residencial z.14 y la del centro comercial z.10, el uso de la desinfección por medio de cloro (tricloro) posterior a los sistemas de tratamiento aerobio (lodos activados), se obtienen resultados de THM's por debajo de los niveles de alerta.
4. En la planta oficinas z. 11 y residencial z.11, el uso de la desinfección por medio de cloro (tricloro) posterior a los sistemas de tratamiento anaerobio, cuando no cuenta con un compartimiento para garantizar el tiempo de contacto mínimo propuesto (20 minutos), se obtienen resultados de THM's por arriba de los niveles esperados.

5. De acuerdo con los resultados, las relaciones de generación de los trihalometanos con los parámetros de interés, el comportamiento fue el siguiente: se detectó una relación en la generación de los trihalometanos respecto del aumento en la presencia de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5); se estableció una relación entre el parámetro de sólidos suspendidos totales y turbiedad; esto es un indicativo de que aún se tiene presencia de materia orgánica en la descarga; luego, se detectó una relación con el nitrógeno, el cual, debido a su baja remoción en sistemas anaerobios, se generará si se tiene esta tecnología en el sistema de tratamiento; no existe relación directa entre la generación de trihalometanos con la temperatura del efluente y el pH que este lleve en la descarga, posterior al tratamiento de agua.

6. Con base en las correlaciones realizadas con cada parámetro en relación con los trihalometanos obtenidos, el que obtuvo una mayor relación y puede asociarse de una manera más cercana con la producción de los organoclorados es la DBO_5 , ya que su valor R cuadrado es el que más se acerca a 1 (0,9073); en comparación con los otros parámetros como turbiedad (0,6735), nitrógeno (0,6477), sólidos suspendidos totales (0,4692), pH (0,3865) y temperatura (0,2331).

RECOMENDACIONES

1. Establecer para el área nacional, incluso servir de referencia en la región centroamericana, el aceptar como el límite máximo aceptable de 80µg/l de trihalometanos totales, lo establecido por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) para la descarga de cualquier sistema de tratamiento de agua residual, no importando hacia dónde haga su conexión final.
2. Realizar pruebas para la propuesta de aireación en el tanque de contacto para aumentar oxígeno disuelto previo a descargar y ayudar a reducir niveles de THM's en posible formación posterior, a la desinfección por medio de cloro. Esto continuaría reduciendo el material orgánico presente en el agua de dicho tanque.
3. Debido a las contraindicaciones encontradas en este trabajo y sus documentos complementarios que se identificaron, utilizando cloro en sus distintas presentaciones, se recomienda utilizar otros sistemas enfocados en la desinfección, para que así se eviten parámetros altos de trihalometanos en las descargas de los sistemas de tratamiento de agua residual en Guatemala.
4. Una de las propuestas de sistemas alternativos para encontrar posibles soluciones al problema de la generación de THM's es el proceso de declorar el efluente. Se deberán cuidar los costos adicionales a la operación y mantenimiento, dependiendo qué solución se utilice. Los químicos que se proponen pueden ser: bisulfito de sodio, carbón activado, entre otros.

5. Facilitar instrumentos y equipos de medición de parámetros de trihalometanos totales, para que sea, por medio de protocolos informativos, un informe periódico y la presentación del parámetro en mención; que esto sirva para validar la correcta operación del sistema de desinfección en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala.
6. Mantener un mejoramiento continuo en los sistemas de tratamiento es parte del aporte que se puede generar como valor entregado. Este mejoramiento se refiere a la incorporación de tecnología avanzada, como los aparatos de medición en línea, específicamente para TTHMS (THM – 100; Aqua Metrology Systems).
7. Con la actualización del Sistema de Geoposicionamiento de las descargas de los Entes Generadores de Aguas Residuales (SIGEGAR) del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), se podría gestionar el apartado para la inclusión del informe del parámetro puntual, y con esto actuar en plan de alerta, para plasmar pasos a seguir al estar por fuera del rango establecido.
8. Como parte de un proceso en la profesionalización de egresados de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hídricos, sirva este estudio especial y su publicación, como punto de partida para los muchos tópicos que de este puedan gestionarse, para la aplicación y buenas prácticas en cuanto a la gobernanza de las aguas residuales y el futuro del agua en nuestro mundo.
9. Un papel relevante en este tema es la importancia que adquiere la operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua residual, ya que con ello se puede velar y monitorear la calidad del sistema de

desinfección, así como de sus compartimientos. Se recomienda que el personal a cargo cuente con capacitación preliminar y constante para validar el cuidado de la generación de subproductos de la desinfección.

REFERENCIAS

1. Acevedo Moraga, L. (2015). *Evaluación de procesos de desinfección (cloro y UV) en sistemas de tratamiento de aguas servidas descentralizados (humedales construidos)*. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Ambientales, Chile. Recuperado de <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-loreto-acevedo-2015.pdf>.
2. ALMAR (2017). *Nuevas tecnologías en aguas residuales*. Madrid: Iagua. Recuperado de <https://www.iagua.es/noticias/almar-water-solutions/nuevas-tecnologias-aguas-residuales>.
3. Barreto Sáenz, P. (2010). Procedimiento de muestreo de agua superficial Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú. Recuperado de https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/PROCEDIMIENTO_DE_MUESTREO_DE_AGUA_SUPERFICIAL.pdf.
4. Brenes Varo, J. (2006). *Diseño del proceso de tratamiento terciario de ozonización del agua de salida de una EDAR convencional para su reutilización en un campo de golf*. España: Universidad de Cádiz, Facultad de Ciencias, Ingeniería Química.

5. Carreón Cordero, E. (2009). *Efecto del ozono en la formación de subproductos del proceso TPA+Cloro aplicado a agua residual*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=4ENRYL&i=29&d=true&t=search_0&v=1&as=0&q=*:
6. COGUANOR NTG 29001 (2009). *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones*. Guatemala. Recuperado de <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2015/07/04-COGUANOR-NTG-29-001-1a-Revision.pdf>.
7. García Gutiérrez, L. (2017). *Evaluación del tratamiento terciario actual de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus central*. Licenciatura en Ingeniería Química Industrial, Facultad de Ingeniería, Guatemala.
8. Gómez Sierra, O. (2014). *Determinación de trihalometanos (THM's) en aguas tratadas de la ciudad de Pereira mediante cromatografía de gases por microcaptura de electrones*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Química Industrial, Colombia.
9. Hua, G y Yeats, S. (2010). Control of trihalomethanes in Wastewater Treatment. *Florida Water Resources Journal*, Recuperado de https://www.fwrj.com/techarticles/0410%20FWRJ_tech1.pdf.
10. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales. (2006). *Desinfección de aguas residuales y la presencia de trihalometanos en el agua*. Barcelona. Recuperado de <https://hispagua.cedex.es/node/61343>.

11. López Vásquez, C., Buitrón Méndez, G y García, Héctor (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. Inglaterra. 2008. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Lopez-Vazquez/publication/321145597_Tratamiento_biologico_de_aguas_residuales_principios_modelacion_y_diseno/links/5a0ff13daca27287ce274c28/Tratamiento-biologico-de-aguas-residuales-principios-modelacion-y-diseno.pdf.
12. Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, redes de alcantarillado y bombeo*. España: McGraw-Hill.
13. Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. INC. España: McGraw-Hill. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/290416625/Ingenieria-de-Aguas-Residuales-Completo>.
14. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Acuerdo Gubernativo 236-2006. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala. Recuperado de <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2015/07/07-Acuerdo-gubernativo-236-2006-Reglamento-descargas-y-reuso.pdf>.
15. Ministerio de Salud de Honduras (1995). *Norma técnica para la calidad del agua potable, Acuerdo No. 084. Parámetros para desinfectantes y subproductos de la desinfección*. Honduras. Recuperado de <http://www.aguasdesiguapeque.com/imagenes/Archivos%20PDF/Norma%20Tecnica%20calidad%20del%20agua%20potable.pdf>.

16. Núñez Cerrato, E. (2020). *Determinación de la presencia de trihalometanos totales (THM's), en agua para consumo humano proveniente de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Recuperado de <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1319>
17. Presidencia de la República de Costa Rica (2007). *Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales, Decreto No. 33601*. Costa Rica. Recuperado de <http://www.regenciaquimica.ucr.ac.cr/sites/default/files/33601-s-minae.pdf>.
18. Ramírez Vásquez, A. (2020). *Determinación de la presencia de trihalometanos totales (THM's) como subproducto de la desinfección en el proceso de potabilización de agua superficial para consumo humano*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Recuperado de <https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/view/1094>.
19. Real Academia Española, (2020). *Diccionario del Español Jurídico*. Madrid, España. Recuperado de <https://dpej.rae.es/>.
20. Reglamento para la calidad del agua potable. Decreto Ejecutivo No. 38924-S. (2007). Desinfectantes y otros subproductos de la desinfección. Costa Rica. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?par

am1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTip
M=TC.

21. Reglamento Técnico Salvadoreño (2018). *Agua de consumo humano. requisitos de calidad e inocuidad*. El Salvador. Recuperado de http://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/reglamento/rts_calidad_e_inocuidad_del_agua_para_consumo_humano_v1.pdf.
22. Romero Rojas, J. (2010). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. 3ª. ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
23. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento*. México: D.F.: Comisión Nacional de Agua. Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>.
24. Wastewater Technology Fact Sheet (1999). *Chlorine Disinfection, United States Environmental Protection Agency (EPA)*. Office of Water. Washington, D.C.
25. World Health Organization (2006). *Guía para la calidad del agua para consumo humano*. Ginebra. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958spa.pdf?ua=1>.

APÉNDICES

Apéndice 1. Proceso de medición de cloro libre



Fuente: [Fotografías de Jesús Sobalvarro]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala). Colección particular. Guatemala.

Apéndice 2. Proceso de experimentación



Continuación del apéndice 2.



Fuente: [Fotografías de Jesús Sobalvarro]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala). Colección particular. Guatemala.