

Artículo Científico / Scientific Article

Determinación de trihalometanos totales posterior al proceso de desinfección en sistemas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala

Determination of Total Trihalomethanes after the Disinfection Process in Wastewater Treatment Systems in Guatemala

Jesús Sobalvarro.¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: cj.sobalvarro@gmail.com

Recibido: 23/03/2023

Revisión: 08/08/2023

Aceptado: 08/12/2023

Resumen

En Guatemala, el método de desinfección más económico para el tratamiento de aguas residuales es la cloración, generando trihalometanos (THM) como principal contaminante. Este estudio evaluó los niveles de trihalometanos totales (TTHM) en plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) aerobias y anaerobias que utilizan cloración. Se empleó el método HACH 10132 para análisis, diseñado para agua potable adaptado a aguas residuales domésticas. Se tomaron muestras de seis PTAR en cinco zonas de la ciudad de Guatemala. De las 30 muestras analizadas, el 83% superó los límites de TTHM establecidos por la USEPA (80 µg/l). Los resultados de cloro residual indicaron que el tricloro fue la fuente predominante de TTHM. Se identificaron correlaciones significativas (coeficiente > 0.6) entre el tricloro y parámetros como DBO5, sólidos suspendidos y turbiedad en el 50% de las variables estudiadas. Estas asociaciones sugieren la influencia de la materia orgánica en la formación de TTHM. Este estudio destaca la necesidad de reconsiderar la eficacia y sostenibilidad de la cloración en el tratamiento de aguas residuales, así como la importancia de monitorear y controlar los niveles de TTHM para garantizar la calidad ambiental y la salud pública.

Palabras claves: aerobio, anaerobio, cloración, calidad del agua, tiempo de contacto.

Abstract

In Guatemala, the most cost-effective disinfection method for wastewater treatment is chlorination, leading to trihalomethanes (THMs) as the primary contaminant. This study assessed total trihalomethanes (TTHM) levels in aerobic and anaerobic WWTPs utilizing chlorination. The HACH 10132 method was employed for analysis, originally designed for drinking water but adapted to domestic wastewater. Samples were collected from six WWTPs in five zones of Guatemala City. Of the 30 analyzed samples, 83% exceeded TTHM limits set by the USEPA (80 µg/l). Residual chlorine results indicated trichloro as the predominant TTHM source. Significant correlations (coefficient > 0.6) were identified between trichloro and parameters like BOD5, Suspended Solids, and Turbidity in 50% of the studied variables. These associations suggest the influence of organic matter in TTHM formation. This study underscores the need to reconsider the efficacy and sustainability of chlorination in wastewater treatment, as well as the importance of monitoring and controlling TTHM levels to ensure environmental quality and public health.

Key words: aerobic, anaerobic, chlorination, water quality, contact time.



Introducción

En Guatemala el método de desinfección más económico y accesible en el tratamiento de aguas residuales es la cloración. Los compuestos de cloro más comúnmente usados en las plantas de tratamiento de agua residual -PTAR- son el cloro gas (Cl_2), el ozono (O_3), y el dióxido de cloro (ClO_2) (Brenes, 2006; Ocampo Rodríguez et al., 2022).

Desinfectar el agua residual puede representar un problema de contaminación grave tanto a nivel urbano como rural, afectando los mantos freáticos, pozos de agua (mecánicos y/o artesanales), ríos y/o riachuelos.

Cuando se usa cloro en la desinfección de aguas residuales, el principal precursor de los subproductos de la desinfección es la materia orgánica, en especial ácidos húmicos y fúlvicos. De acuerdo con Brungs (1973) y Reyes (2016), la principal desventaja de la cloración es la generación de subproductos tóxicos, debido al impacto que estos efluentes clorados pueden ocasionar en los ecosistemas que los reciben.

En la década de los años 70, se descubrió que el cloro reacciona con la materia orgánica presente en el agua generando subproductos de desinfección (SPD), como los trihalometanos (THM) (Gómez, 2014).

Desde esa fecha se han realizado estudios sobre la naturaleza tóxica de los mismos, así como se han implementado las disposiciones necesarias para que cualquier contaminación generada por productos derivados de la desinfección sea lo más baja posible, sin poner en peligro la desinfección (Melendreras, 2016).

De acuerdo con Reyes (2016), se han realizado pocas investigaciones acerca de la formación de los subproductos de la cloración de aguas residuales, por lo que es necesario determinar la presencia de dichos compuestos en el agua tratada, así como su comportamiento en el ambiente una vez que es descargada a cuerpos de agua y/o reusada en el riego de diversos cultivos agrícolas.

Reyes (2016), evaluó la formación de cloraminas y trihalometanos (THM), generadas en los procesos de desinfección de agua residual, en las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) sur y oriente de la ciudad de Durango, determinando que en ambas plantas

se formaron cloraminas de 439 a 470 $\mu\text{g/l}$ y trihalometanos de 96 a 122 $\mu\text{g/l}$.

Gómez (2014), determinó que el cloroformo es el subproducto que presentó una mayor concentración en las muestras analizadas, por lo que el autor afirma que éste es el compuesto más representativo del grupo de trihalometanos totales.

Cáceres Poma y colaboradores (2021), evaluaron la eficiencia de tres sistemas de depuración de aguas residuales domésticas, obteniendo resultados que evidencian que existen diferencias significativas entre los sistemas de depuración, determinándose como el más eficiente al conformado por *Eisenia foetida* con *Eichornia crassipes*, con un descenso medio 94.48% de sólidos totales en suspensión (STS), 98.41% de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y 100.00% de coliformes termo tolerantes.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006) en su primera edición del año 1984 de las guías para la calidad del agua potable recomienda valores permisibles únicamente del cloroformo en 0.3 mg/l , ya que disponía pocos datos de los demás trihalometanos.

Estudios realizados en diversas PTAR de la región de Murcia indican que, la desinfección con hipoclorito, este adiciona cloratos al agua y genera trihalometanos, siendo el principal compuesto el “cloroformo”. De ese estudio, se obtienen resultados, en la salida de cloración, en donde las concentraciones se presentaron en su máximo nivel, arrojando resultados de 70 $\mu\text{g/l}$ (Lahora Cano, et al., 2019).

El amonio reduce la formación de subproductos de desinfección como los THMs porque reacciona con el cloro, impidiendo que este reaccione con la materia orgánica. Esta reacción suele evitar la formación de los subproductos clorados en concentraciones mayores, manteniéndolos por debajo de los límites regulatorios, como lo señala la legislación europea, que establece un límite de 100 $\mu\text{g/L}$ para THMs en el agua potable, mientras que en algunos casos se han registrado niveles mucho más bajos, inferiores a 20 $\mu\text{g/L}$ (Krishnaswamy, 2021).

Algunos estudios también muestran que, cuando se controla adecuadamente la relación entre amonio y cloro, los niveles de THMs pueden reducirse

significativamente en comparación con otros sistemas de desinfección. Esto es coherente con el comportamiento observado en plantas de tratamiento de aguas residuales donde se utilizan cloraminas, que tienden a producir menos subproductos clorados que el cloro libre (Tako, 2011)

En Centroamérica, la regulación de trihalometanos en agua potable es limitada y varía entre países, siendo uno de los pocos contaminantes regulados en la región. Según Sobalvarro (2022), las normativas vigentes en algunos países son las siguientes:

“En Costa Rica, el Decreto Ejecutivo No. 38924-S (2007) regula la calidad del agua potable, y en su Anexo 1, Tabla No. 5, establece un valor máximo admisible (VMA) de 200 µg/l para el cloroformo, uno de los trihalometanos. En Panamá, el reglamento técnico del COPANIT y la DGNTI (1999) fija un límite de 0.1 mg/l en la Tabla No. 4 de características químicas orgánicas. De manera similar, en Honduras, la norma técnica para la calidad del agua (1995), en su Anexo 1, Tabla 8, establece un límite de 200 µg/l para el cloroformo.

El Reglamento Técnico Salvadoreño (2018), en el Anexo 1, Tabla III de desinfectantes y subproductos de desinfección, establece un límite máximo permisible de 0.3 mg/l para el cloroformo, reflejando el enfoque regulatorio de la región hacia este compuesto específico en la calidad del agua potable.”

En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala (ERIS se han realizado las investigaciones siguientes relacionadas a los TTHMs:

1. Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHMs) como subproducto de la desinfección en el proceso de potabilización de agua superficial para consumo humano realizado por Ramírez y Much (2021) quienes indicaron que existen concentraciones de TTHMs por arriba del valor recomendado en el agua para consumo en las zonas estudiadas.
2. Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHMs), en agua para consumo humano proveniente de aguas

subterráneas de la ciudad de Guatemala realizado por Nuñez Cerrato (2022), quien si encontró presencia de TTHMs por arriba del límite máximo permisible (LMP) de la National Primary Drinking en dos de los cuatro puntos muestreados.

Materiales y método

El estudio cuenta con un enfoque cuantitativo exploratorio, ya que este busca generar información respecto a la presencia de TTHN en las aguas residuales posterior a procesos de desinfección.

• Caracterización

Las muestras se captaron en la caja toma de muestras, ya que, parte de los enfoques del estudio es presentar las oportunidades y desafíos que se tienen al no contar con un sistema de desinfección completo, es decir, clorador con su tanque de contacto, y una adecuada caja toma de muestras. Se ha identificado cuales sistemas cuentan con ello y cuáles no, para efectos del tiempo de contacto y sus resultados.

Para poder identificar y clasificar el tipo de afluentes y efluentes en estudio, se realizó la caracterización de estos en cuatro sistemas de tratamiento con tecnología aerobia y dos con tecnología anaerobia que usan cloración como método de desinfección, ubicadas en la ciudad de Guatemala (ver tabla siguiente para ubicación y características de las PTAR del estudio).

Cada una de estas se caracterizaron, determinando las características físicas, químicas y biológicas, por medio de un análisis de agua para determinar niveles de parámetros de interés (SST, DBO₅, turbiedad y nutrientes como nitrógeno y fósforo).

Las muestras de agua residual se tomaron a la entrada y salida de las plantas evaluadas, en el período comprendido entre el 12 de febrero al 19 de febrero del año 2020. Para el traslado y análisis de las muestras, se respetaron los tiempos mínimos entre toma de muestra y llegada al laboratorio.

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

- Trihalometanos totales TTHM
- Potencial de hidrógeno

- Conductividad eléctrica
- Sólidos suspendidos totales
- Temperatura
- Turbiedad
- DQO
- DBO₅
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Cloro residual

sedimentador final y clarificador, sistema de desinfección. Sí cuenta con tanque de contacto a Colector Municipal
 Descarga: conectado a Colector Municipal
 Fuente: Sobalvarro (2022)

El cloro residual se midió en campo por medio de pruebas rápidas de colorimetría. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” de la ERIS.

• **Determinación de número de muestras**

La distribución binomial es una distribución de probabilidad de variables discretas, cuenta el número de éxitos en una frecuencia de n ensayos independientes entre sí. (ver Figura 1 y Tabla 3).

Tabla 1. Información PTAR evaluadas

Descripción sistema de tratamiento	Datos
Edificio de oficinas Zona 11: 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 y clarificador, sistema de desinfección. No cuenta con tanque de contacto	Ubicación: Zona 11
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Anaerobio
	Descarga: conectado a Colector Municipal
Edificio de apartamentos “Zona 16”: 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 y clarificador, sistema de desinfección. Sí cuenta con tanque de contacto	Ubicación: Zona 16
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Anaerobio
	Descarga: conectado a Colector Municipal
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 y clarificador, sistema de desinfección. Sí cuenta con tanque de contacto	Ubicación: Zona 10
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Aerobio
	Descarga: conectado a Colector Municipal
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 y clarificador, sistema de desinfección. No cuenta con tanque de contacto	Ubicación: Carretera al Atlántico CA-9 zona 18
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Aerobio
	Descarga: conectado a cuerpo receptor
Edificio de apartamentos “Zona 11”: 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 y clarificador, sistema de desinfección. No cuenta con tanque de contacto	Ubicación: zona 11 Colonia Mariscal
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Anaerobio
	Descarga: conectado a Colector Municipal
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),	Ubicación: Zona 14 Colonia La Villa
	Aguas Ordinarias
	Tipo de Tratamiento: Sistema Aerobio

- Punto de muestreo: seis plantas de tratamiento de agua residual de la ciudad de Guatemala en complejos privados y que cuenten con una operación y mantenimiento conforme a las buenas prácticas y recomendaciones del manual del diseñador.
- Diseño de muestreo: toma de muestra en el tanque de toma de muestras, posterior al tanque de contacto de cloro por PTAR de cada muestra será nulo pues se tomarán todas las muestras un mismo día. La toma se hace en la “caja toma de muestras” o de no contar con dicha cámara, posterior al sistema de desinfección
- Identificación de la variable dependiente: Trihalometanos totales (TTHM).
- Cuantificación: Valor esperado (Referencia Norma COGUANOR NGO 29 005; Agua envasada para consumo Humano; Tabla 4. Sustancias orgánicas Volátiles.
 Dentro de la norma: $x \leq 0.010$ mg/l
 Fuera de la norma: $x > 0.010$ mg/l
- Limitantes: Logística y económica en el número total de muestras disponibles, n = 30 (5 muestras por punto)
- Para cada punto de muestreo: n_i
 6 plantas con n = 5 muestras
- Análisis individual por planta (n = 5 muestras)

Debido a que, solamente existen parámetros de regulación en agua de consumo humano, inclusive EPA no cuenta con un valor específico, el éxito del estudio se basará en determinar, en n muestras, presencia o no de THM totales.

¿Con cuántos éxitos podemos decir que el evento no es aleatorio?

Dado que el estudio no cuenta con antecedentes, se asume una probabilidad de incidencia de 0.5, lo que representa un escenario completamente aleatorio. Sin embargo, también se realiza un análisis utilizando una probabilidad de 0.7 con el propósito de hacer comparaciones y mostrar la variabilidad en los resultados exitosos obtenidos. Esto permite validar los hallazgos al observar los éxitos necesarios en cada escenario probabilístico:

$$P = 0.5$$

$$n = 8$$

$$e = 1$$

En la Tabla 3, se presenta el número de éxitos en casos probabilísticos

Tabla 3. 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 debe de 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 debe de 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: Sobalvarro (2022)

Entonces:

$$H_0: P = 0.5$$

$$H_a: P > 0.5$$

En donde:

H_0 : Significancia establecida para el experimento
 H_a : 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 H_0 , evidencia de que se está ante una práctica inapropiada.

Nivel de significancia $\alpha=0.05$

Resultados

En las tablas 4 a la 9 se presentan los resultados de cloro residual obtenidos para cada planta. El cloro residual se midió en campo por medio de pruebas rápidas de colorimetría.

Los valores a la entrada son más bajos que a la salida en todas las plantas. La mayor diferencia se presentó en la planta de la residencial zona 14, con valores promedio de 3.0 (mg/L) a la salida y 0.3 (mg/L) a la entrada; por el contrario, la menor diferencia se presentó en la PTAR de la residencial zona 16, con valores promedio de 0.74 (mg/L) a la salida y 0.34 (mg/L) a la entrada.

Tabla 4. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR del edificio de oficinas zona 11

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.42
Salida	(mg/L)	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.20

Tabla 5. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR del edificio de apartamentos zona 11

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
Salida	(mg/L)	3.0	3.0	1.5	3.0	1.5	2.40

Tabla 6. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR de residencial condominio zona 18

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
Salida	(mg/L)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.50

Tabla 7. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR del edificio de apartamentos residencial zona 14

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
Salida	(mg/L)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.00

Tabla 8. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR del edificio de apartamentos zona 16

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.34
Salida	(mg/L)	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.70

Tabla 9. Resultados cloro residual obtenido en la PTAR del centro comercial zona 10

Punto de muestreo	unidad	Muestreo No.					Promedio
		1	2	3	4	5	
Entrada	(mg/L)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.30
Salida	(mg/L)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00

Parámetros físicos y químicos

En la Tabla 10 (página siguiente) se presentan los resultados promedio de los parámetros físicos y químicos evaluados para cada planta, las muestras fueron tomadas a la salida del sistema, donde:

- 1) EAOM: PTAR del edificio de oficinas zona 11
- 2) EAM: PTAR del edificio de apartamentos zona 11
- 3) RC: PTAR de residencial condominio zona 18
- 4) EA: PTAR del edificio de apartamentos residencial zona 14
- 5) EAC: PTAR del edificio de apartamentos zona 16
- 6) CCF1: PTAR del centro comercial zona 10

Trihalometanos

En la tabla 11 (página siguiente) se presentan los resultados de los trihalometanos para cada planta. El valor más alto es en la PTAR de EOM con valor promedio de 376.2 µg/L; por el contrario, el valor más bajo es en la PTAR de CCF1 con valor promedio de 74.4

µg/L. Observe que únicamente la PTAR CCF1 cumple con los límites de la US. EPA.

En la tabla 13 se presentan los valores normados para trihalometanos de diferentes instituciones.

Tabla 13. Valores normados trihalometanos

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

Fuente: elaboración propia, en base a Guidelines for Drinking-water Quality, WHO. National Primary Drinking Water Regulations, EPA.

En las figuras de la 1 a la 6 se muestra la comparación de los valores obtenidos de TTHM en la salida de las distintas PTAR evaluadas, comparándolo con el LMP de la US.EPA.

Tabla 10. Resultados parámetros fisicoquímicos obtenidos en la salida de las PTAR evaluadas

Parámetro	Unidad de medida	Punto de muestreo					
		EOM	EAM	RC	EA	EAC	CCF1
Potencial de Hidrógeno	unidades de pH	7.6	6.7	7.0	6.3	5.8	6.2
Conductividad eléctrica	µs/cm	1,153	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	(NTU)	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

Tabla 11. Resultados trihalometanos totales obtenidos en la salida de las PTAR evaluadas

Muestreo No.	TTHM (µg/L)					
	Punto de muestreo					
	EOM	EAM	RC	EA	EAC	CCF1
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

Figura 1. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR EOM comparado con el límite US. EPA

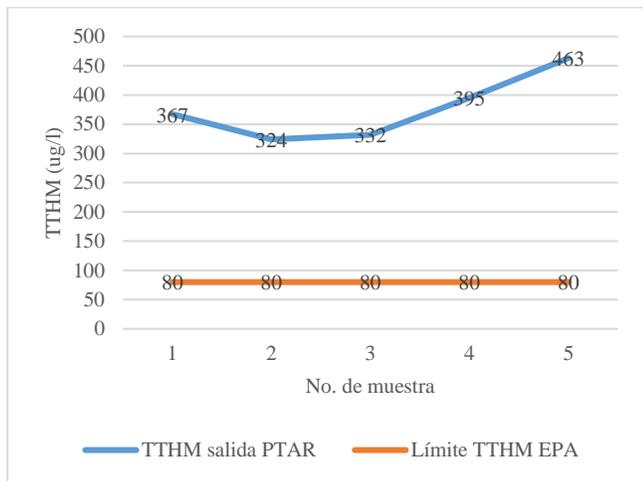


Figura 2. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR EAM comparado con el límite US. EPA

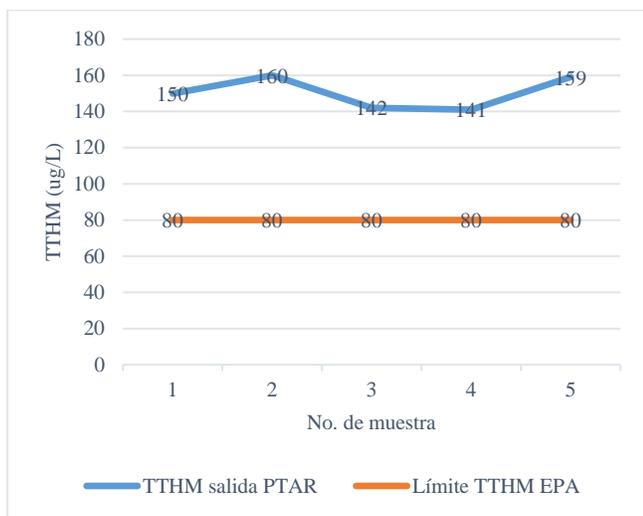


Figura 3. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR RC comparado con el límite US. EPA

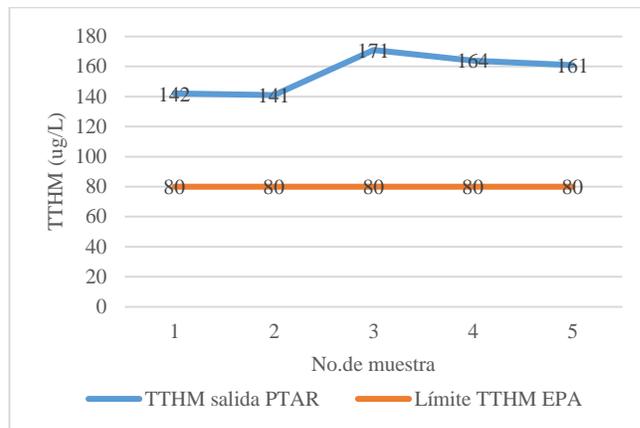


Figura 4. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR EA comparado con el límite US. EPA



En la figura 7 se muestra el valor promedio de TTHM de cada una de las PTAR evaluadas y su comparación con el límite de TTHM de la US.EPA.

Figura 5. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR EAC comparado con el límite US. EPA

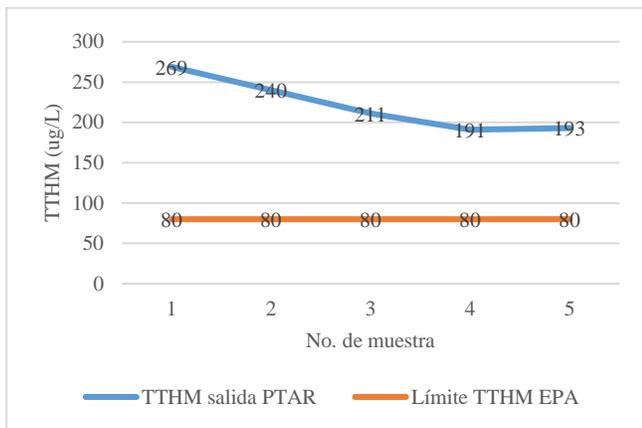


Figura 6. Gráfica comparativa TTHM obtenidos en la PTAR CCF1 comparado con el límite US. EPA

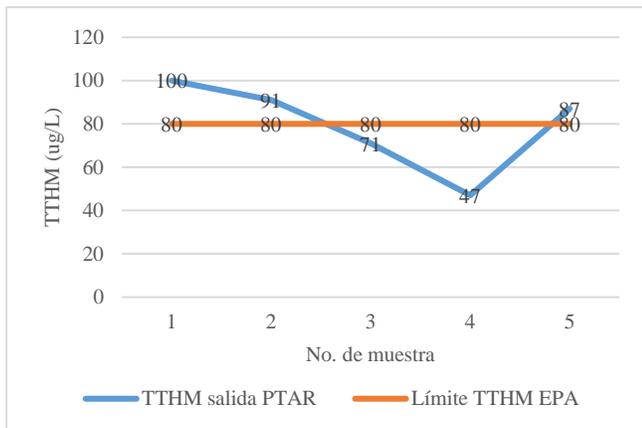
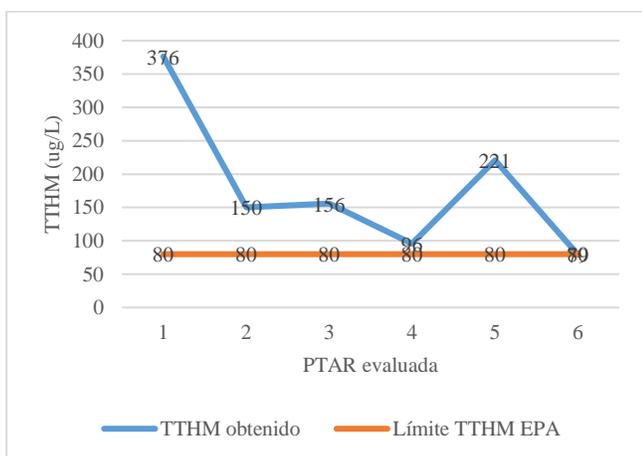


Figura 7. Gráfica comparativa TTHM promedio de cada una de las PTAR evaluadas comparado con el límite US. EPA



Discusión de resultados

Acorde a los resultados mostrados en las tablas de la 4 a la 9, referente al cloro residual, se puede observar que todos los valores de cloro residual a la salida de las PTAR son mayores que a la entrada.

Análisis TTHN en las salidas de las PTAR

En las figuras de la 1 a la 6, se presentan las gráficas donde se comparan los resultados de los límites de la US. EPA y los valores obtenidos en la salida de cada una de las PTAR evaluadas, los cuales se analizan de la forma siguiente:

PTAR edificio de oficinas zona 11(EAOM): los resultados promedio de TTHM son mayores que el límite de la US. EPA en todos los muestreos.

PTAR edificio de apartamentos zona 11 (EAM): los resultados promedio TTHM son mayores que el límite de la US. EPA en todos los muestreos.

PTAR residencial condominio zona 18 (RC): los resultados promedio de TTHM son mayores que el límite de la US. EPA en todos los muestreos.

PTAR edificio de apartamentos residencial zona 14 (EA): los resultados promedio de TTHM de los muestreos 2 y 3 son mayores que el límite de la US. EPA, los resultados promedio de TTHM de los muestreos 1, 4 y 5 son menores que el límite de la US. EPA.

PTAR edificio de apartamentos zona 16 (EAC): los resultados promedio de TTHM son mayores que el límite de la US. EPA.

PTAR centro comercial zona 10 (CCF1): los resultados promedio de TTHM de los muestreos 1, 2 y 5 son mayores que el límite de la US. EPA, los resultados promedio de TTHM de los muestreos 3 y 4 son menores que el límite de la US. EPA.

De acuerdo con los resultados promedio de TTHM de cada planta, únicamente la PTAR del centro comercial zona 10 (74 µg/L) cumple con el límite de la US. EPA.

De un total de 30 muestras realizadas, posterior al tratamiento de cada punto estudiado y con las

condiciones de cada punto estudiado, en los sistemas anaerobios, el 100% del total de muestras presentan valores de TTHM por encima de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, haciendo referencia que, se midieron en cuanto a los valores en agua de consumo humano se refieren (0.08mg/l) En los sistemas aeróbicos, el 75% del total de muestras presentan valores de TTHM por encima de los niveles máximos permitidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos haciendo referencia que, se midieron en cuanto a los valores en agua de consumo humano se refieren (0.08mg/l). Esto genera la necesidad de tener un mejor control de las descargas de dichos efluentes y que estas no perjudiquen el tratamiento.

Como se observa en las tablas 4 a la 9, en todas las muestras existe valores de cloro muy bajos, sin que esto afecte la vida de las colonias de bacterias para llevar a cabo un proceso biológico dentro de la PTAR. En la salida, sí existe presencia de cloro residual lo que se vincula a la cloración del suministro de agua potable.

Los resultados obtenidos muestran que todas las muestras contenían cloro, lo que dificulta garantizar que los Trihalometanos fueron generados por la aplicación del tricloro. Se observa una considerable disminución en niveles de Trihalometanos cuando estos tuvieron un tiempo de contacto y cuando no fueron expuestos a ello coincidiendo con lo indicado por Clayton y colaboradores (2010).

Por lo expuesto, si la desinfección se hará por medio de cloro en cualquiera de sus presentaciones, es necesario que se tenga el área de contacto para que el efluente pase por dicho elemento.

De acuerdo con el comportamiento de los resultados obtenidos, los parámetros que tienen mayor vinculación con materia orgánica son la DBO₅, los sólidos suspendidos y la turbiedad, que dan indicios que con ellos se generan los subproductos, del tipo Trihalometanos Totales, objeto de este estudio.

Siendo así, el estudio de la generación de subproductos de la cloración en aguas residuales enfocados en Trihalometanos no tendrá que detenerse en esta publicación, sino más bien se deberá de

continuar con las pruebas y con las relaciones de los indicios hallados en este trabajo.

La presencia de nitrógeno en las aguas residuales significa que se reduzca el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, siendo este tóxico para el ecosistema acuático, lo cual entraña un riesgo para la salud pública que, junto al fósforo (P), son nutrientes utilizados por organismos fotosintéticos (eutrofización). El nitrógeno se encuentra presente en diferentes formas, lo que permite convertir el nitrógeno amoniacal en otros productos fácilmente separables del agua residual.

Actualmente en Guatemala, no se tienen establecidos niveles normados para los Trihalometanos Totales (TTHM) en las descargas de agua residual. La norma que sí menciona es la Norma Guatemalteca Obligatoria (NGO) Coguanor 29005; Agua Envasada para consumo Humano, la cual cita Sustancias Orgánicas Volátiles, el valor en 0.010 mg/l como Límite Máximo Permitido, y, EPA, utiliza un límite más estricto de 0.080 mg/l (80µg/l).

El valor de TTHM de la U.S.EPA se consideró en este estudio, ya que no hay referencia para descargas en aguas residuales, para la identificación y determinación de los niveles obtenidos en las muestras caracterizadas.

Conclusiones

El presente estudio confirma la generación de Trihalometanos Totales (TTHM) como resultado del proceso de desinfección mediante cloración del agua residual tratada en ambas tecnologías evaluadas. Se observó que, tras el tratamiento biológico y posterior desinfección en plantas de tratamiento de agua residual ordinarias, se produce una cantidad significativa de TTHM.

Es relevante destacar que el método de análisis utilizado está diseñado para agua potable. Sin embargo, los datos obtenidos se encuentran dentro del rango esperado, lo que sugiere una posibilidad de utilizar este método en el tratamiento de agua residual doméstica. Las principales diferencias entre agua potable y agua residual incluyen la carga orgánica y la presencia de compuestos químicos diversos en el agua residual, que pueden influir en la formación de subproductos de desinfección.

Estas observaciones abren la oportunidad para desarrollar métodos específicos que consideren las particularidades del agua residual doméstica. Este estudio puede servir como punto de referencia para comparativas futuras y el desarrollo de planes de acción basados en estos hallazgos, proporcionando una base sólida para mejorar la gestión de la calidad del agua tratada.

Los niveles de Trihalometanos Totales posterior a los sistemas de tratamiento de agua luego de su proceso de desinfección por medio de cloro (triclora en todos los casos), tomando como base el promedio final del conjunto de muestras, sobrepasan en un 83% de las veces, el límite establecido por la US. EPA (80 µg/l).

En las Plantas Residencial Z.14 y Centro Comercial Z.10, con cloración (triclora) posterior a los sistemas de tratamiento aerobio (lodos activados), se obtuvieron resultados de THM debajo de los niveles de alerta, posiblemente por la tecnología aerobia, un sistema maduro en cuanto a su funcionamiento biológico y un efectivo tiempo de contacto.

En las Plantas Oficinas Z. 11 y Residencial Z.11, el tiempo de contacto de cloro puede tener una incidencia en los resultados obtenidos de THM por arriba de los esperados, evidenciando la importancia que tiene el tiempo de contacto para la generación de THM.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios del autor.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Sobalvarro, J. (2023). Determinación de trihalometanos totales posterior al proceso de desinfección en sistemas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(2), Artículo e1534. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i2.1534>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: J.S

Referencias

- Brenes Varo, J.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*. [Tesis de licenciatura, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/6383>
- Brungs, W. A. (1973). Effects of residual chlorine on aquatic life. *Water Pollution Control Federation*, 45(10), 2180–2193.
- Cáceres Poma, D.K., Calisaya Vera, G.M., y Bedoya-Justo, E. (2021). Eficiencia de *Eisenia foetida*, *Eichornia crassipes* e hipoclorito de calcio en la depuración de aguas residuales domésticas en Moquegua, Perú. *Ecología Aplicada*, 20(1), 83–92. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i1.1692>
- Clayton, G.E., Thorn, R.M.S., Reynolds, D.M.(2019) Comparison of trihalomethane formation using chlorine-based disinfectants within a model system; applications within point-of-use drinking water treatment. *Frontier in Environmental Science*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00035>
- Gómez Sierra, O. (2014). *Determinación de trihalometanos (THM's) en aguas tratadas de la Ciudad de Pereira mediante cromatografía de gases por micro captura de electrones*. [Tesis de licenciatura, Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/items/d71ef7c2-64c5-4724-a1de-ecbbbca85cbb>
- Krishnaswamy, P. (2021). *Quaternary Ammonium Compounds as Precursors to Disinfection Byproducts*. [Master's thesis, University of Nevada, Las Vegas]. <https://dx.doi.org/10.34917/28340349>
- Lahora Cano, A., Ayuso García, L.M., & Martínez López, S. (2019). Subproductos de la desinfección de aguas residuales con hipoclorito: cloratos y trihalometanos. *Tecnoagua*, 35(1), 54-63.
- Melendreras Ruiz, F.J. (2016). *Estudio de la formación de trihalometanos en las fases de*

- elaboración de transformados vegetales y en procesos auxiliares de la industria alimentaria.* [Tesis de doctorado, Facultad de Química, Universidad de Murcia]
<https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/47836>
- Norma técnica para la calidad del agua (1995). Anexo 1: parámetros de calidad de agua
- Núñez Cerrato, E. A. (2022). Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHMs) en agua para consumo humano, provenientes de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(2), 6–18.
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v16i2.1319>
- Ocampo Rodríguez, D.B., Vásquez Rodríguez, G.A., Martínez Hernández, S., Iturbe Acosta, U., Coronel Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido paracético. *Ingeniería del agua*, 26(3), 185-204.
<https://doi.org/10.4995/Ia.2022.17651>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2006). *Guía para la calidad del agua para consumo humano*. Ginebra, Suiza.
<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Ramírez Vásquez, A. F., & Much Santos, Z. (2021). Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHMs) como subproducto de la desinfección en el proceso de potabilización de agua superficial para consumo humano. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(1), 17–24.
<https://doi.org/10.36829/08ASA.v16i1.1094>
- Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales, Decreto No. 33601. (2007). Costa Rica.
- Reglamento para la calidad del agua potable, Decreto Ejecutivo No. 38924-S. (2007). Desinfectantes y otros subproductos de la desinfección, Costa Rica.
- Reglamento técnico salvadoreño, agua de consumo humano. Requisitos de calidad e inocuidad. (2018). Desinfectantes y subproductos de desinfección, El Salvador.
- Reglamento técnico panameño del COPANIT y DGNTI (1999).
- Reyes López, M.G. (2016). *Uso del Cloro en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas: Desinfección y Formación de Subproductos*. [Tesis de maestría en Ciencias en Gestión Ambiental, Centro de Investigación Interdisciplinario Para El Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional de México].
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2894633>
- Sobalvarro, J. (2022). Determinación de niveles de trihalometanos totales (THM) posterior al proceso de desinfección en sistemas típicos de tratamiento de aguas residuales en Guatemala. [Tesis de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala].
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/17050/1/Carlos%20Jes%C3%BAs%20Antonio%20Sobalvarro%20Woods.pdf>
- Tako, S. (2011). *Ammonium removal from drinking water: Comparison of breakpoint chlorination and biological technology*. [Conference paper]. Conference of Junior Researchers in Civil Engineering. ResearchGate].
<https://www.researchgate.net/publication/314053248>