



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHM's), EN
AGUA PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

Ing. Erikson Alexander Nuñez Cerrato

Asesorado por el Msc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHM's), EN
AGUA PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA
CIUDAD DE GUATEMALA**

ESTUDIO ESPECIAL

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

ING. ERIKSON ALEXANDER NUÑEZ CERRATO
ASESORADO POR EL MSC. ING. ZENÓN MUCH SANTOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Inga. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	Msc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Msc. Ing. Jorám Matías Gil Laroj
EXAMINADOR	Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre

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 LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHM's), EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 24 de septiembre de 2019.

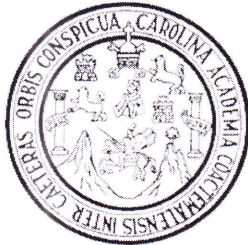


Erikson Alexander Nuñez Cerrato

Correo electrónico: erikson1980@outlook.com

Carné núm.: 2019-90108

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. 86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt



Desde 1964
ERIS
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hídricos

Guatemala, 08 de junio de 2020

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 la presencia de Trihalometanos
Totales (TTHM's), en agua para consumo humano
proveniente de aguas subterráneas de la ciudad de
Guatemala".**

Elaborado por el Ingeniero Erikson Alexander Nuñez
Cerrato 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 Muñoz Santos
Asesor del estudio





Guatemala, 11 de septiembre de 2020

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 LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS
TOTALES (TTHM's) EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO
PROVENIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD
DE GUATEMALA**

Presentado por el estudiante:

Ing. Erikson Alexander Nuñez Cerrato

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán/Ernesto Pocasangre

Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos y, M.Sc. Ing. Joram Matías Gil Larroj, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo del estudiante Ing. Erikson Alexander Nuñez Cerrato, titulado: **DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHM's) EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO PROVENIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE GUATEMALA.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los dieciseis días del mes de septiembre de 2020.

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

Georgina Waleska Sarmiento y mis hijos Fabian Alexander y Sofia Alessandra, su amor y apoyo han sido los pilares de todo este esfuerzo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas hacia el aprendizaje y por permitirme culminar otra etapa más en mi crecimiento profesional.
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos	A todo el personal administrativo, catedráticos y compañeros con quienes compartimos momentos memorables dentro y fuera de aulas.
Msc. Ing. Zenón Much	Gracias por guiarme por el camino correcto, sus enseñanzas siempre las voy a tener presentes y sus consejos nunca los olvidaré y los voy a tener presentes como el regalo más grande que puedo recibir de alguien, muchas gracias maestro y amigo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XX
ANTECEDENTES.....	XXI
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Desinfección	1
1.1.1. La cloración	1
1.1.1.1. Subproductos potenciales derivados de la cloración	1
1.2. Los trihalometanos	3
1.2.1. Parámetros que inciden en la formación de TTHM's	3
1.2.1.1. Efecto de la Materia Orgánica Natural (MON).....	4
1.2.1.1.1. Sustancias húmicas	4
1.2.1.2. El potencial de hidrógeno	4
1.2.1.3. La temperatura.....	6
1.2.1.4. La dosis de cloro	7

1.3.	Procesos de tratamiento para la reducción de trihalometanos totales	7
1.3.1.	Coagulación acentuada	8
1.3.2.	La preoxidación	8
1.3.3.	La combinación de sulfato de aluminio con quitosana.....	9
1.3.4.	Adsorción de carbón activado.....	9
1.3.5.	Remoción de la materia orgánica natural con carbón activado	10
2.	METODOLOGÍA	11
2.1.	Descripción del sitio de estudio	11
2.2.	Descripción del diseño de investigación	12
2.2.1.	Distribución de probabilidad binomial	12
2.2.2.	Diseño de muestreo	15
2.2.3.	Análisis estadístico	15
2.3.	Procedimiento	16
2.4.	Normas de calidad de agua para consumo humano	16
3.	RESULTADOS	19
3.1.	Tablas de resultado.....	19
3.1.1.	Resultados de las repeticiones en los muestreos ...	20
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23
4.1.	Gráficos.....	23
4.1.1.	Cloro residual	24
4.1.2.	Potencia de hidrógeno.....	26
4.1.3.	La conductividad eléctrica	28
4.1.4.	Sólidos disueltos.....	30
	CONCLUSIONES	33
	RECOMENDACIONES	35
	BIBLIOGRAFÍA	37

APÉNDICES.....	41
----------------	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Porcentaje de formación de DBP's	2
2.	Efecto de la MON en la formación de TTHM's y HAA's	5
3.	TTHM's, según la concentración de TOC y de bromuros	5
4.	Efecto del pH y el tiempo de reacción en la formación de TTHM's	6
5.	Evolución de la concentración de TTHM's y el tiempo de contacto	7
6.	Localización de fuentes de muestreo	11
7.	Función de densidad de probabilidad de éxito	13
8.	Gráfica de distribución $x < 80 \mu\text{g/L}$	14
9.	Gráfica de distribución $50 \mu\text{g/L} < X < 600 \mu\text{g/L}$	14
10.	Diseño de muestreo	15
11.	TTHM's promedio en los 4 puntos de muestreo	23
12.	Atribución del cloro en la formación de TTHM's	24
13.	Demanda de cloro en las 4 muestras analizadas	25
14.	Atribución del pH en la formación de TTHM's	26
15.	pH	27
16.	Atribución de la C.E. en la formación de TTHM's	28
17.	Conductividad eléctrica	29
18.	Atribución de los S.D. en la formación de TTHM's	30
19.	Sólidos disueltos	31

TABLAS

I.	Subproductos de la desinfección	2
II.	Número de éxitos en casos probabilísticos.....	12
III.	Normas de calidad de agua para consumo humano	17
IV.	Resultados promedio de las 4 muestras analizadas	19
V.	Resultados M-1	20
VI.	Resultados M-2	20
VII.	Resultados M-3	21
VIII.	Resultados M-4	21
IX.	Prueba de normalidad de datos	22
X.	Intervalo de confianza.....	22

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CH ₃ CN	Acetonitrilo
CH ₃ COOH	Ácido acético
HAAs	Ácidos acéticos halogenados
TCAA	Ácido tricloroacético
H ₂ O	Agua
CON	Carbón orgánico natural
TOC	Carbón orgánico total
Cl ₂	Cloro
CHCl ₃	Cloroformo
C.E.	Conductividad eléctrica
DBPs	Derivado de los subproductos
LMA	Límite máximo admisible
LMP	Límite máximo permisible
L	Litros
MON	Materia orgánica natural
µg	Microgramos
Mg	Miligramos
ml	Mililitros
ppb	Partes por billón
pH	Potencial de hidrógeno
S.D.	Sólidos disueltos
T°	Temperatura
THM's	Trihalometanos

GLOSARIO

Ácidos acéticos halogenados	Una familia de compuestos orgánicos basados en la molécula del ácido acético (CH_3COOH), en la que uno o más átomos de hidrógeno unidos a los átomos de carbono son reemplazados por un elemento halógeno (cloro, bromo, flúor y/o yodo).
Ácido tricloroacético	Es un ácido orgánico, derivado del ácido acético, en el cual tres átomos de hidrógeno del grupo metilo han sido reemplazados por átomos de cloro.
Agua	Es un líquido incoloro, inodoro e insípido que está compuesto por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O). A presión atmosférica normal (760 mm de mercurio), el punto de congelación del agua es a los $0\text{ }^\circ\text{C}$ y su punto de ebullición, a los $100\text{ }^\circ\text{C}$.
Agua de consumo humano	Agua apta para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal.
Cloro	Es un gas de olor sumamente irritante. Se usa en la manufactura de numerosos productos. También se usa para desinfectar el agua, aunque el cloro mismo se transforma rápidamente a otras sustancias al comienzo de este proceso. Mucha gente cree

erróneamente que el agua clorada contiene cloro elemental (Cl_2).

Cloroformo

Es un líquido incoloro de aroma agradable no irritante y de sabor ligeramente dulce. Se enciende espontáneamente cuando alcanza temperaturas muy altas. Pequeñas cantidades de cloroformo se forman cuando se añade cloro al agua.

Desinfectante precursor

Originado por los procesos de desinfección del agua utilizando químicos, ya que estos reaccionan con la materia orgánica de origen natural que potencialmente pueda dar lugar a la formación de subproductos (DBPs).

Carbono orgánico total

Se denomina así al carbón que forma parte de las sustancias orgánicas de las aguas superficiales, es un parámetro que se utiliza para valorar la calidad de las aguas de un determinado lugar.

Carbono orgánico disuelto

Es la fracción de carbono orgánico total que puede pasar a través de un filtro, que normalmente oscila en tamaño desde 0,22 y 0,7 micrómetros.

Materia orgánica natural

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.

**Trihalometanos
totales**

Es la suma de los cocientes de la concentración de cada uno de los parámetros (cloroformo, dibromoclorometano, bromodiclorometano y bromoformo).

RESUMEN

En este estudio de investigación se analizó la presencia de TTHM's en aguas subterráneas de la Ciudad de Guatemala, evidenciando que en 2 de las 4 muestras hay presencia de TTHM's que sobrepasan los Límites Máximos Permisibles (LMP) de 80 µg/L, según la National Primary Drinking Water Regulations. Se demostró que el aumento de TTHM's está relacionado con variables como el pH, el cloro residual, el tiempo de contacto, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos; a mayores concentraciones, se incrementan los niveles de TTHM's.

Se analizó la formación en 4 puntos de la red de distribución realizando 7 repeticiones por cada muestra con un intervalo de confianza del 95 %. De las 7 repeticiones en cada una de las muestras se obtuvieron los siguientes promedios: muestra No. 1 con un valor de 63 µg/L, [desviación estándar de 5,22, intervalo de confianza de (3,36-11,50)], muestra No. 2 con 110 µg/L, [desviación estándar de 50, intervalo de confianza de (32,20-110,05)], muestra No. 3 con 80 µg/L, [desviación estándar de 13,34, intervalo de confianza (8,59-29,37)] y muestra No. 4 con 212 µg/L, [desviación estándar de 60, intervalo de confianza (38,61-31,92)], evidenciando así que solo la muestra No. 1 y 3 se encuentran en los LMP, mientras que las muestras 2 y 4 no cumplen con los – LMP, según las National Primary Drinking Water Regulations de 80 µg/L.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Estudios epidemiológicos reportados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (AIRC) han asociado que a determinadas exposiciones de TTHM's hay un porcentaje considerable de riesgo en la salud de las personas de mutagenicidad, teratogenicidad, carcinogenicidad, efectos en la reproducción, en neonatos de madres expuestas y, el más estudiado, asociado al cáncer de vejiga.

Los autores Mora, Chamizo y Mata, en el año 2007 en San José, Costa Rica, estudiaron si el cáncer gástrico tiene una relación con la cloración del agua para consumo humano, en razón de esto se realizó un estudio exploratorio-epidemiológico ecológico, con el objetivo de analizar si existe o no relación estadísticamente significativa entre la incidencia de cáncer gástrico (CG) y el consumo de agua clorada en Costa Rica.

Los resultados demostraron que no existe relación entre la incidencia de CG y la cloración, incluida la antigüedad de la misma y el tipo de fuente de agua usada (subterránea), no obstante, se recomiendan promover la elaboración de estudios semejantes a este con otro tipo de cánceres como el de vejiga y el colorrectal¹.

Un estudio publicado en enero del 2020 por la Perspectiva de Salud Ambiental UE (Iro Evlampidou) tuvo como objetivo:

¹ MORA, Darner; CHAMIZO, Horacio; y MATA, Ana. *Cáncer gástrico en Costa Rica: ¿existe o no relación con la cloración del agua para consumo humano?* p. 72

“Evaluar los niveles de TTHM's en el agua potable en la Unión Europea como un marcador de exposición a los derivados potenciales de la desinfección (DBP's) y estimar la carga atribuible del cáncer de vejiga”²

Estudio realizado en 28 países europeos, teniendo como resultado que los hombres expuestos a niveles medios anuales de TTHM's $> 25 \mu\text{g/L} < 50 \mu\text{g/L}$ tuvieron un aumento del 3,4 % en riesgo de cáncer de vejiga, estudio con intervalo de confianza del 95 % y los expuestos a $> 50 \mu\text{g/L} < 100 \mu\text{g/L}$ tuvieron un riesgo del 9 % en comparación con niveles $< 50 \mu\text{g/L}$ y en niveles $> 100 \mu\text{g/L}$ un riesgo mayor de 12 % al 40 %.

Es por tal razón que la problemática se centra en conocer si efectivamente a causa del proceso de desinfección con cloro se están generando subproductos como los TTHM's, por lo que se formula la siguiente interrogante:

¿Existe la formación de trihalometanos totales (TTHM's) en las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala y la probabilidad de riesgo en la salud de las personas?

² IRO EVLAMPIDOU, L.; et al. *Trihalomethanes in drinking water and bladder cancer burden. Environmental Health Perspectives*, pp.9-10

JUSTIFICACIÓN

En Guatemala se han hecho estudios para determinar la calidad de las aguas subterráneas que están siendo servidas a la población y los posibles aportes contaminantes que puedan existir. Diariamente las autoridades encargadas del suministro monitorean la calidad de esta y se analizan los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para determinar su calidad, no así los subproductos derivados del proceso de desinfección como son los TTHM's, que representan un porcentaje de riesgo en la salud de las personas según la Organización Mundial de la Salud (OMS)

Datos publicados por la OMS en el año 2017 revelan que las muertes causadas por cáncer de vejiga en Guatemala llegaron a 57 (0,07 %) de todas las muertes y con una tasa de mortalidad por edad de 0,59 por cada 100 000 habitantes, y según registros tomados del Ministerios de Salud Pública y Asistencia Social de Guatemala la morbilidad por casos de carcinoma *in situ* de órganos digestivos para el año 2019 fue de 9 casos.

Es por tal razón y debido a la probabilidad de amenaza que representa el consumo de agua con presencia de trihalometanos totales en la salud de las personas, que en este estudio especial se investigó si hay o no presencia de compuestos organoclorados, como los trihalometanos totales (TTHM's), para hacer ver a las autoridades encargadas del suministro la importancia de monitorear este compuesto formado por el proceso de desinfección.

OBJETIVOS

General

Determinar si hay presencia de trihalometanos totales (TTHM's) como subproducto de la desinfección en las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Recolectar muestras en 4 puntos de la red de distribución de la zona sur de la ciudad de Guatemala a las cuales se les está aplicando cloro como desinfectante.
2. Monitorear la concentración de cloro residual, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura, para conocer si evidentemente existe relación o no en la posible formación de TTHM's.
3. Comparar los valores obtenidos de TTHM's con los límites máximos permisibles de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) de 80 µg/L.
4. Proponer alternativas de tratamiento para la remoción de TTHM's en el agua potable.

HIPÓTESIS

¿Existe presencia de trihalometanos totales en concentraciones mayores a 80 µg/L en las aguas subterráneas que están siendo utilizadas para consumo humano en la ciudad de Guatemala?

ANTECEDENTES

- Antecedentes nacionales

En Guatemala se han hecho estudios para determinar la calidad de las aguas subterráneas que están siendo servidas a la población y los posibles aportes contaminantes que puedan existir. Se han realizado análisis físicos, químicos y microbiológicos para determinar su calidad, pero no existen estudios en los que se haya analizado si existe formación de subproductos del proceso de desinfección como los trihalometanos totales.

Existe de información nacional pero se tiene en cuenta que la OMS en 2011, la EPA en 1997 y la AIRC han demostrado la presencia de formaciones de sustancias químicas como subproducto de la desinfección del agua para consumo humano y que estos subproductos en altas concentraciones son altamente cancerígenos para la salud de las personas.

Es por tal razón que en este trabajo de investigación se tiene por objetivo determinar si hay o no presencia de trihalometanos totales (TTHM's) en las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala, para así asegurar a la población que el agua utilizada para su consumo es de buena calidad y no representa un riesgo para su salud.

- Antecedentes internacionales

Hiriart, Hernández y Rojo, en el año 2007, en un estudio realizado al agua en la Ciudad de México titulado *Trihalometanos y haloácidos en agua de la*

zona sur de la Ciudad de México, determinaron la concentración de TTHM's y HAA en agua de la zona sur de la Ciudad de México.

Se realizó un análisis estadístico de correlación encontrándose que el cloro residual y los nitratos influían sobre la producción de cloroformo y de trihalometanos totales. Dos muestras de un mismo pozo (N2) presentaron pH > 8, lo que coincide con un incremento significativo en los niveles de TTHM's³.

Vallejo-Vargas y otros autores, en el año 2015, en el trabajo de investigación *Determinación de trihalometanos (TTHM's) en aguas tratadas de la ciudad de Pereira mediante cromatografía de gases por microcaptura de electrones*, encontraron correlación entre el carbono orgánico total (COT) y la influencia en la formación de cloroformo, bromodiclorometano y dibromoclorometano después de la cloración.

En Honduras, en el año 2008, en un estudio realizado por AEAS con título: *Aplicación de floculantes naturales a la producción de agua potable en procesos de decantación lastrada y formación de trihalometanos en la planta de los laureles*, en un periodo de evaluación de 3 días, tuvo como segundo objetivo estudiar la influencia del tratamiento en la reducción del potencial de formación de trihalometanos y la evolución de la composición de la materia orgánica natural, la determinación del potencial de formación de trihalometanos aplicada al agua cruda, agua decantada y filtrada, que mostró valores inferiores a 60 µg/L.

En 2017, Virginia Montero realizó un estudio titulado *Evaluación en el agua para consumo humano de subproductos de cloración y su relación con la formación de trihalometanos*.

³ HIRIART, Marisa; HERNÁNDEZ, Eugenio; y ROJO, Francisco. *Trihalometanos y haloácidos en agua de la zona sur de la Ciudad de México*, pp.5-6

Los resultados obtenidos en las muestras de agua de los sistemas de tratamiento completo encontrando que, de 80 subproductos analizados, 12 superaron el máximo admisible según el Reglamento Nacional de Calidad de Agua para consumo humano, mientras que, de los acueductos abastecidos por aguas subterráneas administrados por la Municipalidad de Cartago, de 76 subproductos analizados solo uno superó el valor máximo permitido. El método de cuantificación por cromatografía de gases con detector de masas mostró ser adecuado y robusto para la detección y cuantificación de trihalometanos, encontrándose valores después del proceso de desinfección en la planta de 283,30 µg/L. por encima de los límites máximos permisibles⁴.

En la zona sur de la ciudad de México se realizó un proyecto de investigación llamado *Trihalometanos y haloácidos en agua*, efectuado en el año 2009, y tuvo por objetivo principal la determinación de trihalometanos en las aguas subterráneas en la zona de Xochimilco, utilizadas para el consumo humano.

Los resultados de la investigación demostraron que las concentraciones de TTHM en todos los casos se encontraron por debajo del límite permisible de 200 µg/L especificado en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF) en 1996 sobre agua para uso y consumo humano. Si se considera el límite de 80 µg/L, establecido por la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) en 1998 para Estados Unidos, se observa que en dos ocasiones (junio y agosto) se sobrepasa o iguala la norma en una sola estación (SL19) de las ocho muestreadas. En época de lluvias se observa un incremento en la concentración de materia orgánica ($r_s=0,8$) y nitratos ($r_s=0,71$), sin embargo, no se observa relación alguna de estos parámetros con la formación de TTHM's⁵.

Si bien los niveles de TTHM's se encuentran por debajo del límite permisible que indica la norma oficial mexicana, se observa que al existir materia orgánica aún en baja concentración (de 0,08 a 4,82 mg/L) y reaccionar esta con el cloro residual, se incrementa la formación de compuestos clorados, como cloroformo y TTHM's, por lo que es deseable controlar este parámetro antes del proceso de desinfección.

⁴ MONTERO, Virgina. *Evaluación en el agua para consumo humano de subproductos de cloración y su relación como inductores de mutagénesis (mutaciones celulares)* pp. 23-27

⁵ HIRIART, Marisa; HERNÁNDEZ, Eugenio; y ROJO, Francisco. *Trihalometanos y haloácidos en agua de la zona sur de la Ciudad de México*. p. 8

Según los autores Bracho, Castillo, Vargas y Morales, en un trabajo del año 2009, la inyección de cloro en diversos puntos, distribuidos durante todo el proceso de potabilización, trajo como consecuencia la formación de 32,43 µg/L de cloroformo, cuando lo máximo permisible corresponde a 30 µg/L.

La eliminación de los puntos de inyección de cloro, en la precloración y la cloración intermedia, permitió la reducción del cloroformo de 32,43 µg/L a 10,57 µg/L, cumpliendo con los niveles permisibles exigidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En esta evaluación se comprobó que los trihalometanos totales (TTHM's) se incrementan linealmente en cada punto de inyección, por lo tanto, al suprimir la precloración y la cloración intermedia, fue eliminado el 67 % de TTHM's⁶.

En la industria de vegetales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, España, en el año 2015, Melandreras realizó una investigación titulada *Estudio sobre la formación de trihalometanos en la fase de transformación en procesos auxiliares*, su objetivo fue aportar nuevos datos que contribuyan a conocer los niveles de trihalometanos generados en la industria de transformados vegetales y determinar las etapas críticas en la formación de los mismos en el agua de pozo utilizada para el proceso. El proceso de extracción de los TTHM's fue el siguiente:

10 ml de la muestra de agua se tratan previamente con 0,1 g de tiosulfato sódico, para eliminar las interferencias provocadas por el cloro libre, posteriormente, la muestra se introduce en un vial de cristal con 2 gramos de sulfato sódico e inmediatamente se encapsula y se agita para su análisis mediante un sistema de espacio de cabeza (*headspace*) donde la muestra es agitada y calentada durante 15 minutos, provocando que los TTHM's que son volátiles queden en la parte superior del vial en forma gaseosa⁷.

En las aguas de consumo (red o pozo) utilizadas en la industria conservera de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia se observa que

⁶ BRACHO, Nibis; CASTILLO, Javier; VARGAS, Luis y MORALES, Ricardo. *Formation of trihalomethanes during the disinfection process in the potabilization of water*, pp. 5-6

⁷ MELANDRERAS, Fuensanta. *Estudio sobre la formación de trihalometanos en la fase de transformación en procesos auxiliares*, p.-125.

el 86,7 % tienen un contenido en trihalometanos por debajo del establecido en la normativa (100 ppb) y el resto se encuentran por encima del límite legal. En general, estas muestras se corresponden con aguas de pozo cloradas y almacenadas por la propia industria, aunque en algunos casos puntuales eran aguas de red suministrada por los municipios.

ALCANCES Y LIMITACIONES

- Alcance

Con el desarrollo de este estudio especial se pretende incluir una nueva línea de investigación que profundice la formación de subproductos en los procesos de desinfección y, aunque este alcance se centra en la formación de trihalometanos totales en la ciudad capital, se considera que con los resultados obtenidos se incide en el interés de otras instituciones para la inclusión de nuevos estudios de las aguas subterráneas que están siendo utilizadas para abastecer a la población y la influencia del cloro como desinfectante potencial y de mayor uso para la desinfección del agua, para así poder prevenir los riesgos de enfermedades atribuibles al cáncer de vejiga por concentraciones que sobrepasan los límites máximos permisibles de la National Primary Drinking Water Regulations (EPA) del año 2009 de 80 µg/L.

- Limitaciones

Las principales limitaciones del estudio son:

En Guatemala y la región centroamericana no hay información específica sobre los efectos y las probabilidades de riesgo en la salud de las personas por el consumo de agua con presencia de compuestos organoclorados como los TTHM's. Hay información sobre el monitoreo de los compuestos organoclorados que se forman en el proceso de desinfección como los TTHM's, ya que en países como Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, en su normativa, no establecen un Límite Máximo Permisible (LMP)

para la suma de todos los trihalometanos que se forman en el proceso de desinfección.

En vista de que la norma COGUANOR NTG 29001 no establece parámetro en su normativa de TTHM's, este análisis de resultados se hará con base en límites máximos permisibles de la National Primary Drinking Water Regulations (EPA) del año 2009.

Por otro lado, no hay autorización por parte del ente encargado del suministro y monitorización del agua de origen subterráneo que está siendo servida a la población para la toma directa de muestras en los diferentes puntos por la incertidumbre y divulgación de los resultados.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Guatemala cuenta con varios pozos perforados que suministran de agua un sector considerable de la zona sur de la ciudad. El cloro es utilizado para la desinfección de las aguas extraídas para hacerlas inocuas, es decir que no perjudiquen la salud de las personas, este agente desinfectante reacciona con la materia orgánica natural presente en el agua formando ácidos fúlvicos y húmicos, generando subproductos derivados de la desinfección como los trihalometanos.

El agua subterránea tiene características diferentes, físicas, químicas y microbiológicas, y puede ser sometida a diversos procesos de potabilización. El origen y tipo de tratamiento al cual se somete el agua van a determinar la clase de sustancias que esta puede contener.

Debido a la posible formación de derivados potenciales de la desinfección (DBP's), se ha decidido en esta investigación analizar la presencia de TTHM's en las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala, utilizadas para el consumo humano, ya que los trihalometanos representan una fracción de subproductos de cloración de los cuales los más estudiados han sido: cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. Teniendo en cuenta los límites máximos permisibles de la National Primary Drinking Water Regulations (EPA) del año 2009 se ha realizado una evaluación para justificar si estos presentan valores menores o mayores a los permisibles, que corresponden a 80 µg/L.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Desinfección

“La desinfección tiene una importancia incuestionable en la seguridad del abastecimiento de agua de consumo humano. La eliminación de microorganismos patógenos es una operación fundamental que muy frecuentemente se realiza con productos químicos reactivos como el cloro”⁸.

1.1.1. La cloración

La cloración es una alternativa para la desinfección del agua ampliamente difundida en los países en desarrollo y constituye la tecnología más conocida por su eficacia, costo de aplicación y por estar histórica y epidemiológicamente comprobada. Este proceso de desinfección, dependiendo del origen y compuestos presentes en el agua, reaccionará formando subproductos potenciales derivados de la cloración.

1.1.1.1. Subproductos potenciales derivados de la cloración

Todos los desinfectantes producen subproductos potenciales de la desinfección (DBP's) inorgánicos u orgánicos, o ambos, que pueden ser perjudiciales para la salud humana. La existencia de riesgo en el agua clorada radica en la toxicidad indirecta de sus subproductos.

⁸ OMS. *Guía para la calidad del agua potable, Normas para la calidad de agua para consume humano*, p. 263.

“Los derivados de la degradación vegetal y animal son compuestos activos que, al reaccionar con el cloro, dan como resultado compuestos orgánicos clorados, entre ellos los TTHM’s”⁹. Como se muestra en la tabla I.

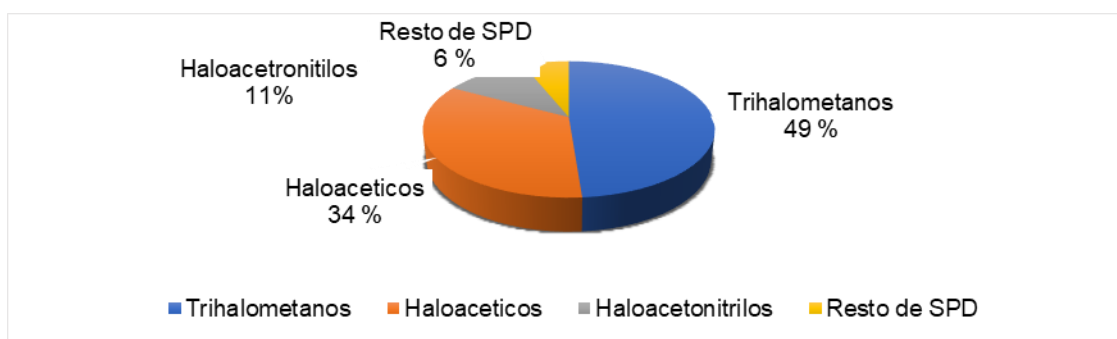
Tabla I. **Subproductos de la desinfección**

Grupo	Subproducto	Formula
Trihalometanos totales (TTHM)	Cloroformo	CHCl_3
	Bromodiclorometano	CHCl_2Br
	Dibromoclorometano	CHClBr_2
	Bromoformo	CHBr_3

Fuente: elaboración propia, con base en: KRASNER, Stuart; KARAFANTIL, Tanju; WESTERHOFF, Paul. *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. American Water Works Association, p. 11.

Los principales porcentajes de subproductos formados durante la cloración se muestran en la figura 1.

Figura 1. **Porcentaje de formación de DBP’s**



Fuente: elaboración propia, con base en: Área de Toxicología de la Universidad de La Laguna. Trihalometanos en agua para el consumo humano. *Revista de Toxicología*. Facultad de Medicina. 2011.

⁹ SÁNCHEZ, Carlos; GONZALES, Luis; ARMENDÁRES, Carlos. *Trihalometanos en agua para consumo humano*, pp.109-114.

1.2. Los trihalometanos

Los trihalometanos conforman el grupo de subproductos más difundido y que mayormente se identifica en las reglamentaciones de los distintos países. Se forman a partir de la sustitución de 3 átomos de hidrógeno del metano (CH₄), por átomos de un halógeno (cloro o bromo, y eventualmente yodo)¹⁰.

$$\text{Cloro residual} + \text{Precursores} = \text{TTHM's}$$

Los trihalometanos no se forman exclusivamente durante el tratamiento del agua, la generación puede continuar desarrollándose en el sistema de distribución por depender de la concentración de los precursores y de la dosis de cloro residual. La formación potencial de TTHM's es la diferencia de la concentración instantánea (punto de muestreo) y final (punto terminal de la red).

La formación de los trihalometanos se desarrolla en dos fases:

- En las primeras 24 horas y supone el 20 al 25 % del total
- Durante los primeros 4 ó 5 días siguientes

1.2.1. Parámetros que inciden en la formación de TTHM's

Son los siguientes:

¹⁰ OMS, *Guía para la calidad del agua potable. Normas para la calidad del agua para consumo humano*, p.367.

1.2.1.1. Efecto de la Materia Orgánica Natural (MON)

“La materia orgánica natural puede ser separada en distintas fracciones, incluyendo ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, ácidos hidrofóbicos, ácidos hidrofílicos, ácidos transfílicos”¹¹. Toda agua contiene una mezcla heterogénea de sustancias orgánicas no bien definidas, que constituyen la materia orgánica natural, entre las que se destacan en aguas subterráneas:

1.2.1.1.1. Sustancias húmicas

La fracción húmica de la materia orgánica la forman principalmente el ácido húmico y el ácido fúlvico, que son polielectrolitos aniónicos con un grado de ionización que depende del pH, por lo que en la remoción de estas sustancias el pH es un factor dominante. Las algas y su material extracelular, extraídos especialmente de organismos tales como la *Anabaena*, que por fotosíntesis produce material orgánico, en su mayoría constitutivo del color. En general, aguas cloradas con mayor nivel de materia orgánica natural tienen mayor tendencia a la formación de subproductos, como el carbono orgánico total (TOC) y el carbono orgánico disuelto (DOC). En la figura 2 se observa el efecto de la MON en la formación de TTHM's y HAA's, para un agua dosificada con 4,3 mg/l de cloro.

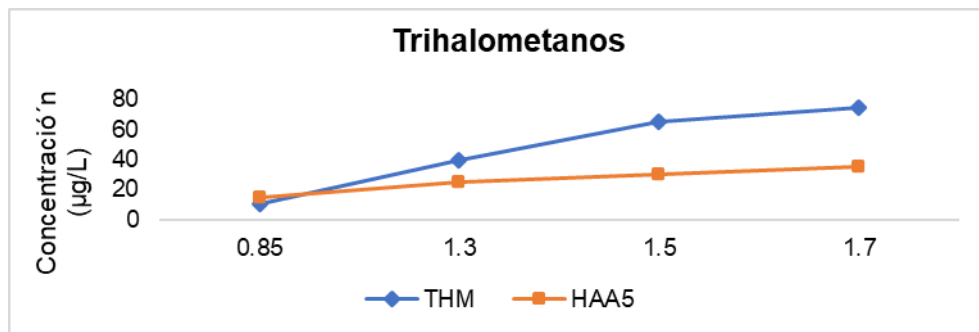
1.2.1.2. El potencial de hidrógeno

Stevens, Seeger y Robeck, en 1976, observaron que la tasa de formación de cloroformo aumenta con el pH. “En cambio, algunos haloacetoneitrilos y

¹¹ OMS. *Guía para la calidad del agua potable. Normas para la calidad del agua para consumo humano*, p. 368.

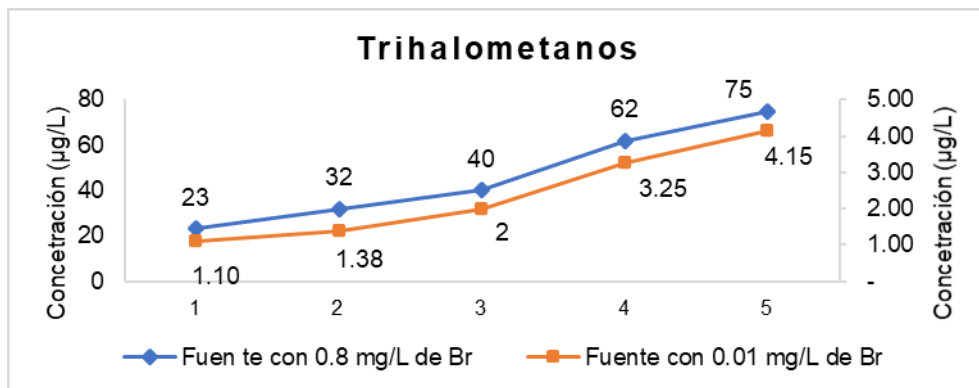
ácidos acéticos halogenados (en particular el dicloroacetonitrilo y el ácido tricloroacético), reducen su concentración al aumentar el pH¹².

Figura 2. **Efecto de la MON en la formación de TTHM's y HAA's**



Fuente: SCHARFENAKER, Mark. *American Water Works Association. Disinfectants and disinfection by products rule, significant excursion guidance manual*, p. 269.

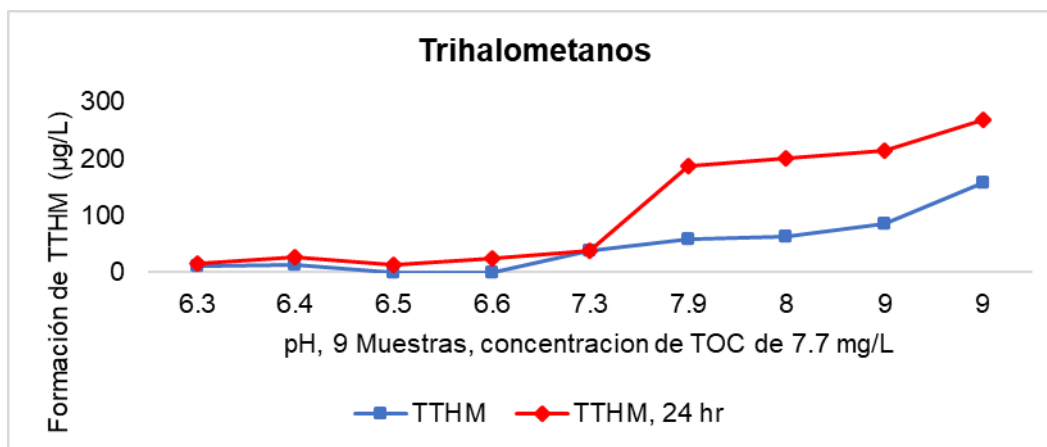
Figura 3. **TTHM's, según la concentración de TOC y de bromuros**



Fuente: XIE, Yuefeng. *Disinfection by products in drinking water, formation, analysis and control*, p-15

¹² KRASNER, Stuart; KARAFANTIL, Tanju; WESTERHOFF, Paul. *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. American Water Works Association, p.12.

Figura 4. **Efecto del pH y el tiempo de reacción en la formación de TTHM's**



Fuente: RODRÍGUEZ, Sindy; LOZADA, Patricia; VÉLEZ, Camilo; CADAVID, Diana y RIVERA, Juan. *Efecto del punto de cloración sobre la formación de trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua*. p. 62.

1.2.1.3. La temperatura

En un estudio realizado sobre 31 sistemas de agua potable, se observó que “la concentración de trihalometanos fue mayor en los sistemas con temperaturas de 24 a 31 °C, respecto a los sistemas con 1,1 a 8,5 °C, y 16 a 23 °C”¹³.

¹³ KRASNER, Stuart; KARAFANTIL, Tanju; WESTERHOFF, Paul. *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. American Water Works Association, pp. 12-13.

1.2.1.4. La dosis de cloro

La dosis de desinfectante aplicada al agua durante el tratamiento afecta directamente la formación de los DBP's, ya que además de favorecer su formación afecta sus características específicas y su importancia relativa. Por ejemplo, una mayor dosis de cloro favorecerá la formación de AHA en lugar de TTHM's, así como también favorece la formación de subproductos clorados respecto a la de los subproductos bromados, tanto para los TTHM's como para los AHA¹⁴.

Figura 5. **Evolución de la concentración de TTHM's y el tiempo de contacto**



Fuente: elaboración propia, con base en: GAMBOA, David. *Modelamiento matemático de las concentraciones de TTHM's en la red matriz del acueducto de Bogotá*, p. 16.

1.3. Procesos de tratamiento para la reducción de trihalometanos totales

Los procesos convencionales de potabilización de aguas, si bien generalmente fueron diseñados para remover contaminantes físicos y biológicos, tienen relativa eficiencia en la remoción de compuestos orgánicos que pueden dar lugar a la formación de subproductos, dependiendo de las características del agua, del tipo de tratamiento y de sus dosis, por lo que se

¹⁴ JALAN, Rajiv; MOOKERJEE, Prosad; ROMBOUTS, Krista; ANDREOLA, Fausto; CHIARRA, Francisco; THOMSEN, Karen. *Treatment of diseases associated with hepatic stellate cell activation using ammonia-lowering therapies*, p. 36.

proponen los siguientes procesos convencionales tomando en cuenta los bajos costos para su aplicación.

1.3.1. Coagulación acentuada

El término coagulación acentuada, aumentada, potenciada o ensanchada (*enhanced coagulation*), se refiere al proceso modificado de coagulación con el objetivo de potenciar la remoción de precursores de DBP's durante la potabilización de aguas. La remoción de materia orgánica natural mediante este proceso, que es altamente efectivo para la remoción de TOC, tanto con sales de aluminio como con sales de hierro, ha sido demostrada por medio de investigaciones de laboratorio y plantas piloto (Environmental Protection Agency en 1999). La aplicación del proceso de coagulación acentuada implica coagular a valores de pH bajos, lo cual generalmente requiere de post-alcalinización permanente para alcanzar los niveles de pH establecidos en las reglamentaciones de calidad de aguas. Es una alternativa que implica mínimos costos de implantación, eleva los costos operativos por consumo de coagulantes y alcalinizantes, requiere de mayor control del proceso, pero es altamente recomendable para aquellas fuentes con elevado contenido de TOC, en las cuales cualquier otra opción representaría ejecutar inversiones de infraestructura.

1.3.2. La preoxidación

Un procedimiento habitualmente utilizado es la aplicación de oxidantes tales como permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno, dióxido de cloro u ozono, para oxidar los precursores de DBP's y posteriormente utilizar cloro con fines de desinfección. Otra alternativa es oxidar después de la coagulación, sedimentación y filtración, lo cual baja la demanda de oxidante y reduce la formación potencial de DBP's¹⁵.

¹⁵ ENOHSA. *Desinfección de sistemas de agua potable en Argentina. Guías para la presentación de proyectos de agua potable*, p. 38.

La preoxidación con ozono, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno o permanganato de potasio contribuye también a un desarrollo más eficiente del proceso de coagulación, incidiendo en la disminución de la concentración de NOM en el agua. Trabajos realizados en la planta potabilizadora de Laguna del Cisne (Canelones, Uruguay) parecen confirmar esta afirmación.

1.3.3. La combinación de sulfato de aluminio con quitosana

Según García, el quitosano es un floculante eficaz para el tratamiento de agua para consumo humano, combinado con el sulfato de aluminio como coagulante presenta una mejor opción para la reducción de la materia orgánica natural (MON), además como coagulante natural presenta las características suficientes puesto que es no-tóxico y biodegradable, además interacciona con contaminantes incluyendo partículas y sustancias disueltas, su uso puede sustituir las sales inorgánicas y polímeros sintéticos en el tratamiento de agua para el consumo humano.

1.3.4. Adsorción de carbón activado

La adsorción de una sustancia es un fenómeno de superficie, que implica la acumulación de sus moléculas en la interfase de un líquido y un sólido o bien de un gas y un sólido. La sustancia que se acumula o adsorbe se denomina adsorbato, mientras que el sólido sobre el cual se produce la adsorción se denomina adsorbente.

Por ser un fenómeno de superficie, la adsorción es mayor cuando mayor es la superficie específica del adsorbente, que se define como la superficie total que está disponible para la adsorción por unidad de peso de adsorbente. La superficie total que está disponible para la adsorción está compuesta por la superficie externa de las partículas del adsorbente y la superficie interna correspondiente a los poros.

Por lo tanto, cuando más poroso es y finamente dividido está el adsorbente, mayor es su capacidad de adsorción¹⁶.

1.3.5. Remoción de la materia orgánica natural con carbón activado

Comparado con otros procesos de tratamiento (coagulación, oxidación), la adsorción en carbón activado aparece como la tecnología más apropiada para el tratamiento de aguas con elevados niveles de precursores de trihalometanos. Los mejores resultados se logran si el precursor se reduce al mínimo posible por coagulación, previo a la adsorción.

¹⁶ ENOHSA. *Desinfección de sistemas de agua potable en Argentina. Guías para la presentación de proyectos de agua potable*, p. 49.

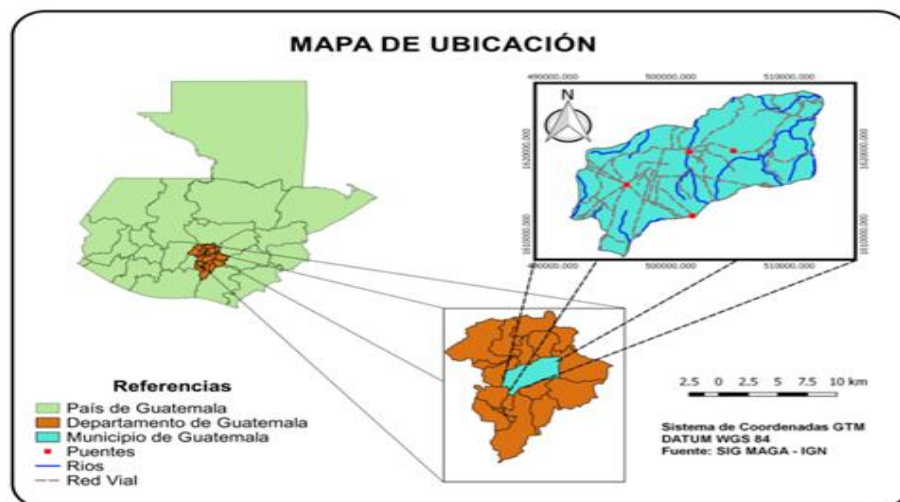
2. METODOLOGÍA

Se extrajeron muestras de cuatro sitios distintos, tomando de aquí en adelante la denominación de M-1, M-2, M-3 y M-4, para facilitar su referencia. Se aplicó la distribución de probabilidad binomial para determinar el número de muestras. A continuación se describe detalladamente el desarrollo de la metodología de toma de muestras y los parámetros que se analizaron.

2.1. Descripción del sitio de estudio

El área de estudio está ubicada en la ciudad de Guatemala, se encuentra en la latitud 14,6407204 y longitud -90,5132675, de la zona sur de la ciudad capital.

Figura 6. Localización de fuentes de muestreo



Fuente: elaboración propia.

2.2. Descripción del diseño de investigación

La presente investigación obedece a un diseño de tipo no experimental, ya que no se manipulan los datos deliberadamente, es decir, en una investigación donde no se hacen variar los datos intencionalmente las variables son independientes, se observan los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos. Como señala Kerlinger.

Es una investigación en que resulta imposible de manipular variables o asignar aleatoriamente a las muestras o a las condiciones, debido a que se realizaron observaciones en un momento único en el tiempo, es decir se midieron las variables de manera individual y se reportaron las mediciones en forma descriptiva, mediante lo cual se buscó relaciones entre las variables y evaluar si existe correlación y causalidad entre las mismas¹⁷.

2.2.1. 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.

Tabla II. 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 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 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 obtener más de una prueba de éxito para determinar que el experimento no es aleatorio.

¹⁷ KERLINGER, Fred. *Enfoque Conceptual de la Investigación del comportamiento: Técnicas y Metodología*, p. 116.

Entonces:

H_0 (establecida para el experimento)	H_a (Hipótesis nula)
$P = 0,5$	$P > 0,05$

Fuente: elaboración propia.

Se justifica que 7 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.

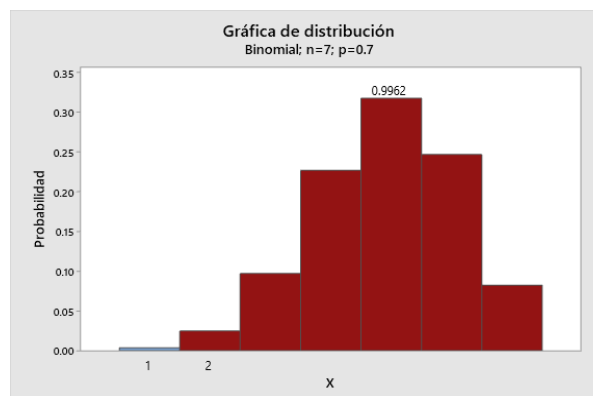
Nivel de significancia $\alpha=0,05$

x	$P(X = x)$
2	0.0250047

n = No. de ensayos	7
p = probabilidad de éxito	0,7
e = muestras positivas	2

Probabilidad de que al menos 2 muestras salgan positivas = 99 %.

Figura 7. Función de densidad de probabilidad de éxito



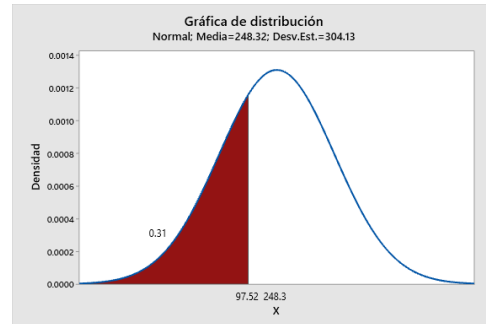
Fuente: elaboración propia.

- Caso No.1:

Figura 8. **Gráfica de distribución $x < 80 \mu\text{g/L}$**

$P(X < 80 \mu\text{g/L})$

n = No. de ensayos	7
p = probabilidad de éxito	0,7
e = muestras positivas	2



Fuente: elaboración propia.

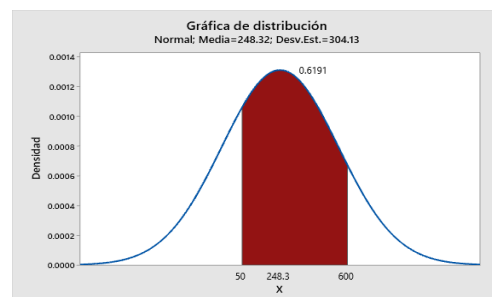
Entonces: $P(X < 80 \mu\text{g/L}) = 31\%$

Caso No. 2:

Figura 9. **Gráfica de distribución $50 \mu\text{g/L} < X < 600 \mu\text{g/L}$**

$P(50 \mu\text{g/L} < X < 600 \mu\text{g/L})$

n = No. de ensayos	7
p = probabilidad de éxito	0,7
e = muestras positivas	2

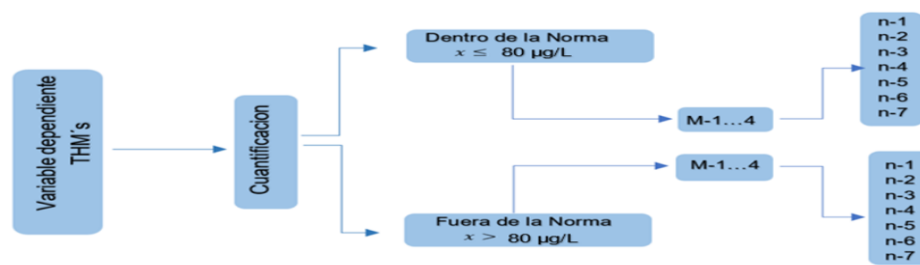


Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Diseño de muestreo

Toma de muestra en 4 puntos de la red de distribución cercanos al sitio después del proceso de desinfección, el espaciamiento temporal por proceso de desinfección de cada muestra será nulo, pues se tomarán todas las muestras un mismo día.

Figura 10. Diseño de muestreo



Fuente: elaboración propia.

Por ser un estudio sin antecedentes en la zona, se asume una probabilidad de incidencia de los resultados de 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.

2.2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los resultados se ha hecho mediante el método de Anderson-Darling, software (análisis de datos Minitab) que mide qué tan bien siguen los datos la distribución binomial, para el conjunto de datos obtenidos y determinar si estos cumplen el supuesto de normalidad para una prueba t.

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

- H0: los datos siguen una distribución especificada
- H1: los datos no siguen una distribución especificada

Si el valor p es menor que el nivel de significancia elegido (0,05), entonces se rechaza la hipótesis de que los datos provienen de una distribución binomial.

2.3. Procedimiento

El parámetro de control para la investigación son los trihalometanos totales y se realizó la medición mediante el método HACH THM Plus (600 ppb), medido en CHCl_3 (ppb), para la determinación de los niveles de trihalometanos totales presentes en las muestras de agua subterráneas se hicieron los análisis en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina, lo cual consistió en: toma de muestra, medición del cloro residual, control del pH, medición de la conductividad eléctrica y sólidos disueltos, así como análisis de los trihalometanos totales.

2.4. Normas de calidad de agua para consumo humano

Las normas internacionales para el agua potable de la OMS, 4ta edición, año 2011, no hicieron referencia a los trihalometanos totales. En la primera edición de las guías para la calidad del agua potable, publicada en 1984, no se recomendó ningún valor de referencia para trihalometanos totales distintos del cloroformo, tras una evaluación de los compuestos. Se estableció un valor de referencia basado en efectos sobre la salud de 300 $\mu\text{g/L}$, únicamente para el cloroformo, ya que se disponía de pocos datos sobre los demás TTHM's y, en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua, el cloroformo era el

compuesto del grupo que se detectaba con mayor frecuencia. Se mencionó asimismo que, aunque los datos toxicológicos disponibles resultaban útiles únicamente para establecer un valor de referencia para el cloroformo, también debían reducirse los demás derivados de los TTHM's.

Tabla III. **Normas de calidad de agua para consumo humano**

PARAMETRO	UNID	GUIA US EPA		COGUANOR NTG 29001	
		LMA	LMA	LMA	LMP
pH	Unid	6,50	6,50	6,50	8,50
Temperatura	°C	18	18	-	-
Solidos Disueltos	mg/L	-	500	750	1 500
Conductividad Eléctrica	µs/cm	-	1 000	500	1 000
Cloro Residual	mg/L	-	-	0,5	1,0
TTHM's	µg/L	-	80	-	-

Fuente: elaboración propia, con base en: EPA. *COGUANOR NTG 29001*. 2009-2013.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan de forma individual los resultados que se obtuvieron en cada punto de muestreo, así como las repeticiones efectuadas a cada muestra, seguida de una representación gráfica del comportamiento para cada una de las variables que intervinieron durante el estudio. Por último, se describen los principales hallazgos en esta investigación.

3.1. Tablas de resultado

Según el diseño estadístico se escogieron 4 puntos de muestreo, en cada una de las muestras se realizaron 7 repeticiones para dar validación al método y comprobar el porcentaje de confianza para la media, mediana y desviación estándar por el método de Anderson-Darling. En la tabla IV se presentan los resultados promedio para los 4 puntos diferentes de muestreo en la red de distribución de agua subterránea que abastece las zonas del sur de la ciudad.

Tabla IV. Resultados promedio de las 4 muestras analizadas

ITEM	pH (Unid)	Cloro Residual (mg/L)	C.E. (μ S/cm)	S.D. (mg/L)	T (°C)	TTHM's (μ g/L)	(EPA) TTHM's 80 μ g/L
M-1	5,93	0,10	143,06	78,68	24	63	Cumple
M-2	7,61	0,50	180,64	99,35	24	110	No cumple
M-3	6,33	0,10	158,11	86,96	24	80	Cumple
M-4	7,67	0,60	262,09	144,15	24	212	No cumple

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Resultados de las repeticiones en los muestreos

Se presentan a continuación:

Tabla V. **Resultados M-1**

M-1	pH (Unid)	C.E. (µS/cm)	S.D. (mg/L)	TTHM's (µg/L)
n-1	5,95	143,34	78,84	66
n-2	6,00	143,02	78,66	64
n-3	5,59	142,98	78,64	58
n-4	5,94	143,41	78,88	60
n-5	5,98	142,87	78,58	57
n-6	6,09	142,92	78,61	61
n-7	5,97	142,87	78,58	72

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resultados M-2**

M-2	pH (Unid)	C.E. (µS/cm)	S.D. (mg/L)	T (°C)	TTHM's (µg/L)
n-1	7,65	178,95	98,42	24	130
n-2	7,62	180,97	99,53	24	140
n-3	7,50	178,85	98,37	24	29
n-4	7,65	179,90	98,95	24	141
n-5	7,58	180,96	99,53	24	118
n-6	7,60	179,22	98,57	24	50
n-7	7,64	185,65	102,11	24	160

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados M-3**

M-3	pH (Unid)	C.E. (µS/cm)	S.D. (mg/L)	T (°C)	TTHM's (µg/L)
n-1	6,32	161,74	88,96	24	95
n-2	6,28	157,98	86,89	24	80
n-3	6,30	150,68	82,87	24	95
n-4	6,31	161,52	88,84	24	75
n-5	6,35	162,35	89,29	24	67
n-6	6,36	161,85	89,02	24	60
n-7	6,37	150,63	82,85	24	85

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados M-4**

M-4	pH (Unid)	C.E. (µS/cm)	S.D. (mg/L)	T (°C)	TTHM's (µg/L)
n-1	7,68	262,58	144,42	24	240
n-2	7,70	260,89	143,49	24	235
n-3	7,65	262,63	144,45	24	205
n-4	7,65	261,69	143,93	24	145
n-5	7,67	260,69	143,38	24	288
n-6	7,64	262,36	144,30	24	250
n-7	7,68	263,81	145,10	24	120

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Prueba de normalidad de datos**

PRUEBA DE NORMALIDAD DE ANDERSON-DARLING				
Descripción	M-1	M-2	M-3	M-4
Valor P	0,566	0,08	0,78	0,436
Mediana	62,57	109,71	79,571	211,86
Desv. Est.	5,224	49,98	13,34	59,91
Varianza	27,286	2.497,57	177,952	3.589,14
Asimetría	0,969227	-1,0175	-0,20383	-0,588801
Curtosis	0,551734	-0,64758	-1,18046	-0,76947
Valor Mínimo	57	29	60	120
1er Cuartil	58	50	67	145
Mediana	61	130	80	235
3er Cuartil	66	141	95	250
Valor Máximo	72	160	95	288

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Intervalo de confianza**

Intervalo de confianza 95%	M-1	M-2	M-3	M-4
Media	57,740 – 67,402	63,49 – 155,93	67,234 – 91,909	156,45 – 267,26
Mediana	57,733 – 67,600	44,40 – 146,07	65,133 – 95,000	138,33 – 260,13
Desviación estándar	3,366 – 11,503	32,20 – 110,05	8,596 – 29,375	38,61 – 131,92

Fuente: elaboración propia.

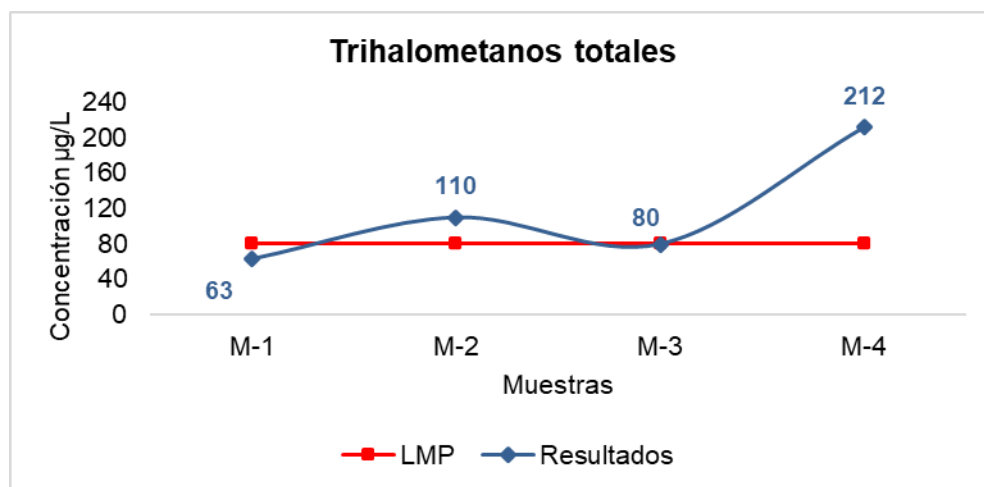
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se detalla gráficamente cada uno de los hallazgos encontrados en las 4 muestras analizadas y la comparación de los parámetros fisicoquímicos analizados como cloro residual, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos con la norma COGUANOR NTG 29001 del año 2013), mientras que los -LMP- de TTHM's se basan en las regulaciones de agua para consumo humano de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) del 2009.

4.1. Gráficos

Son los siguientes:

Figura 11. TTHM's promedio en los 4 puntos de muestreo

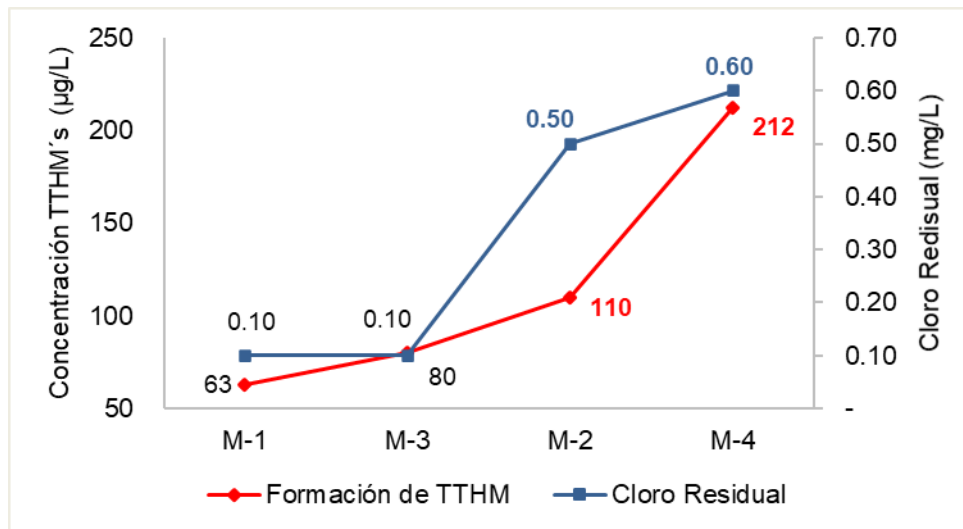


Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Cloro residual

Los resultados son:

Figura 12. Atribución del cloro en la formación de TTHM's

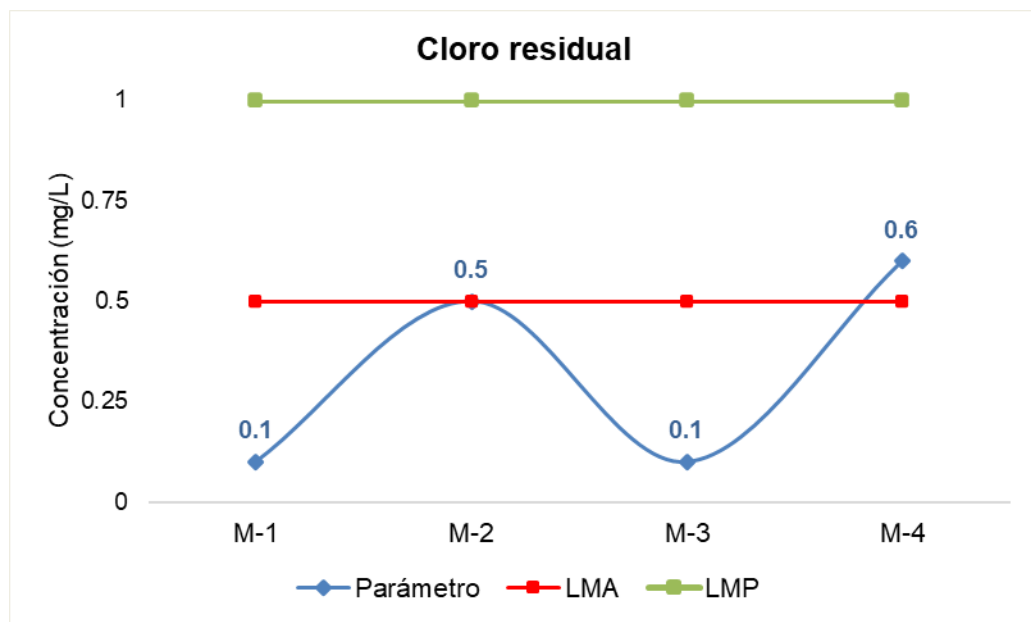


Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta que la dosis de cloro y el tiempo de contacto son el factor predominante para la formación de TTHM's, se puede evidenciar que los resultados de la M-1, con 63 µg/L y M-3 con 80 µg/L, presentaron una menor concentración de precursores orgánicos, por lo que la formación de TTHM's cumple con los -LMP- 80 µg/L de las normas EPA del 2009, pero se asume que si están desinfectando es por presencia de microorganismos donde estos, junto con las concentraciones de precursores orgánicos, dilapidaron el cloro inicial formando TTHM's y bajando los niveles de cloro residual hasta 0,1 mg/L, por lo que no cumplen con los -LMA- de cloro residual, norma COGUANOR NTG 29001 (LMA= 0,5 mg/L, LMP= 1,0 mg/L).

Los resultados de la M-2 con 110 $\mu\text{g/L}$ y M-4 con 212 $\mu\text{g/L}$ presentaron una mayor concentración de precursores orgánicos, por lo que la formación de TTHM's fue mayor y no cumplen con los -LMP- 80 $\mu\text{g/L}$ de la EPA de 2009, de igual manera se asume que si están desinfectando es por presencia de microorganismos donde estos se encontraban en menor cantidad que las muestras 1 y 3, con una demanda de cloro promedio de 0,55 mg/L, por lo que las muestras 2 y 4 sí cumplen con los -LMA- de cloro residual de la norma COGUANOR NTG 29001 (LMA= 0,5 mg/L, LMP= 1,0 mg/L).

Figura 13. **Demanda de cloro en las 4 muestras analizadas**

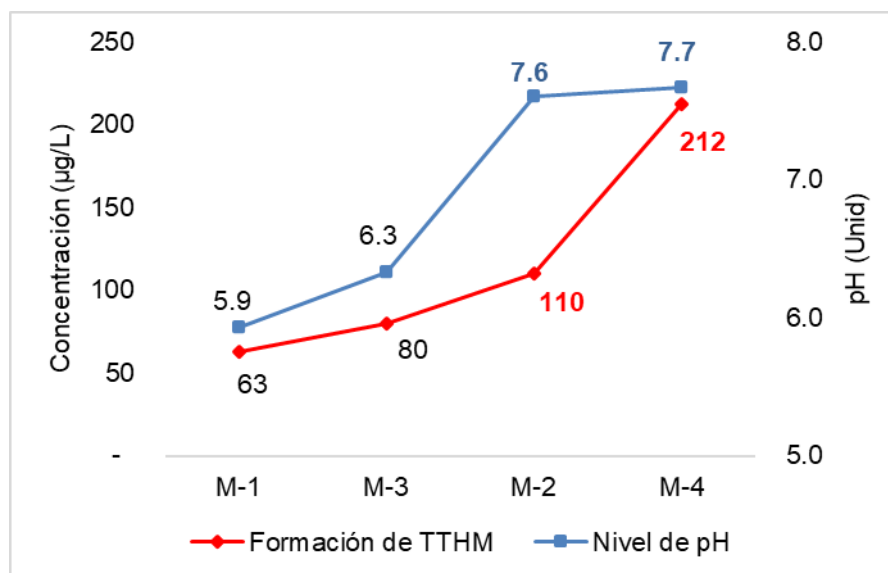


Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Potencia de hidrógeno

Los resultados son:

Figura 14. Atribución del pH en la formación de TTHM's



Fuente: elaboración propia.

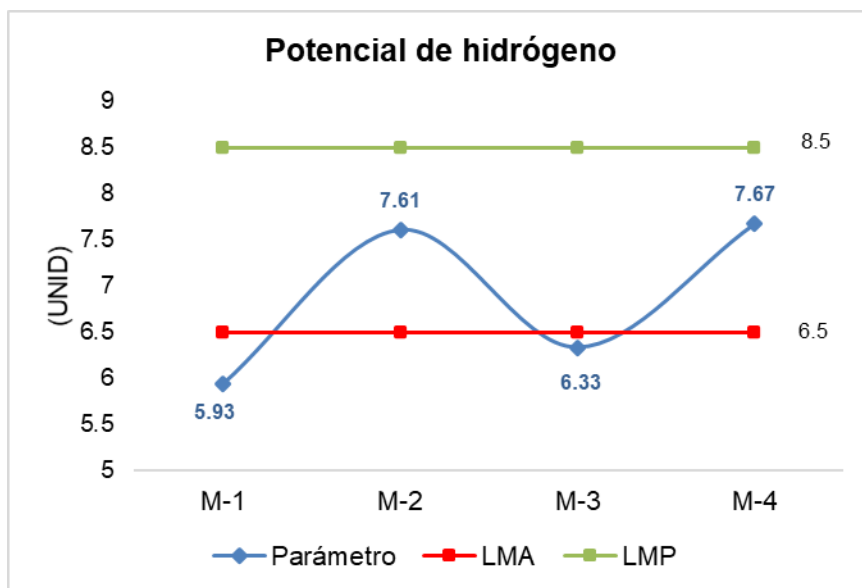
Los niveles de pH en las muestras 1 y 3 presentaron niveles promedio de 6,10 unidades, estas por debajo de LMA= 6,5 y LMP= 8,5, norma COGUANOR NTG 29001 (2013), por lo que se consideran soluciones ácidas ya que la escala es logarítmica, por lo que cada cambio de unidad del pH representa un cambio de diez veces en la acidez, mientras que las muestras 2 y 4 presentaron valores de pH promedio de 7,65 unidades, que sí están bajo los LMA= 6,5 y LMP= 8,5, según norma COGUANOR NTG 29001 de 2013.

A pesar de estar dentro de la norma, la presencia de precursores orgánicos formó ácidos húmicos o fúlvicos polielectrolitos aniónicos con grado

de ionización, donde se comprueba la teoría que dice: cuando los niveles de pH son más alcalinos mayor será la formación de trihalometanos totales por su papel predominante.

Por una parte, la cinética es favorecida por la presencia de la forma no ionizada del HOCl en pH ácido; por otra, es una hidrólisis catalítica en medio básico, favorecida cuando el pH es más alto. Como al final la determinante es la segunda etapa, la formación de los TTHM's se vio favorecida al incremento de los niveles de pH en las muestras 2 y 3.

Figura 15. **pH**

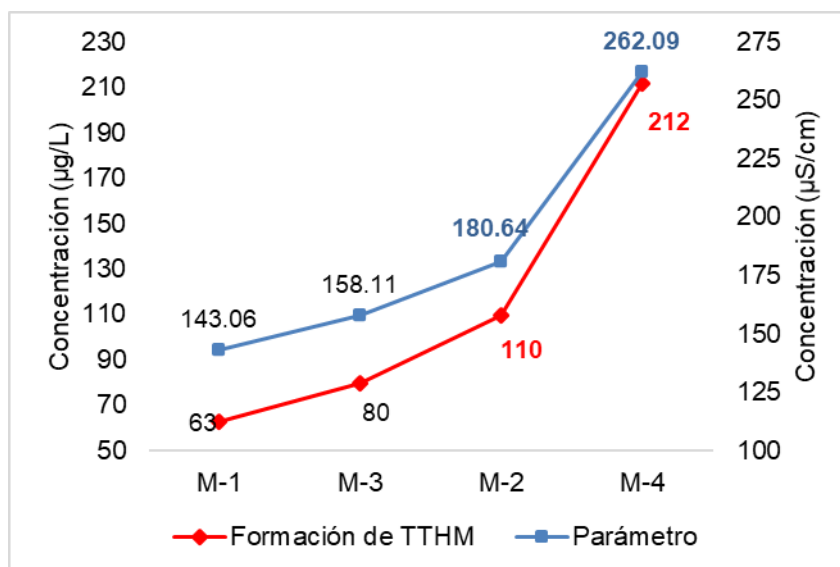


Fuente: elaboración propia.

4.1.3. La conductividad eléctrica

Los resultados son:

Figura 16. **Atribución de la C.E. en la formación de TTHM's**



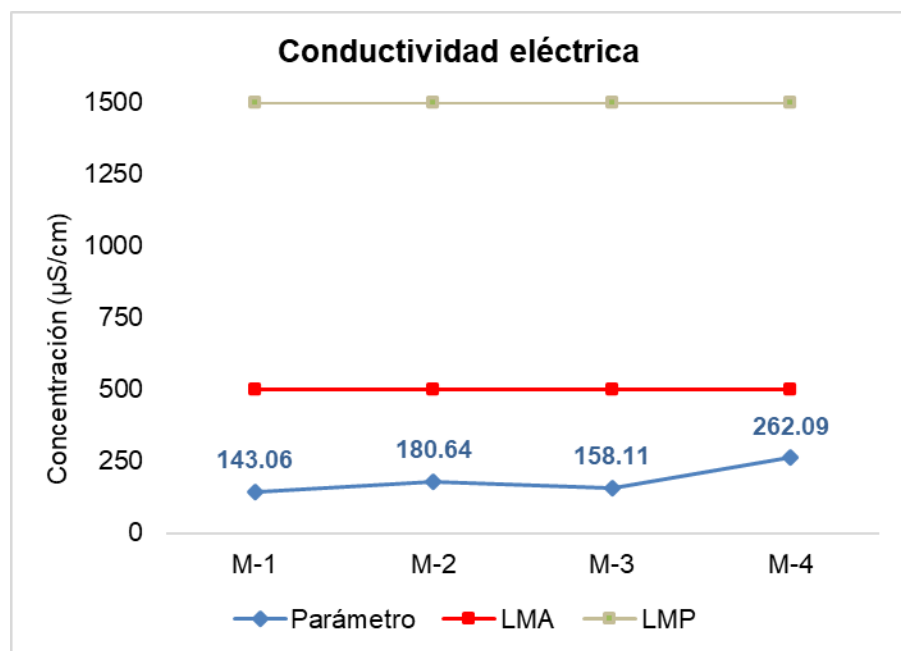
Fuente: elaboración propia.

La conductividad eléctrica de todas las muestras se encuentra bajo el límite máximo admisible de la norma COGUANOR NTG 29001 (750 µS/cm).

La concentración de sustancias por su relación con partículas ionizadas, encontrando que el valor máximo en la M-4 fue de 262 µS/cm, M-2 180 µS/cm, M-3 158 µS/cm y M-1 con 143 µS/cm, valores que según norma COGUANOR NTG 29001 (2013) establece LMA= 750 µS/cm y LMP= 1,500 µS/cm, niveles bajos de conductividad eléctrica encontrados, esto se debe en algunas ocasiones por la exposición de gases atmosféricos como el bióxido de carbono o amoniaco, ya que estos se disuelven fácilmente causando cambios en los

valores de la conductividad eléctrica, no obstante por su relación directa con las partículas ionizadas se encuentra relación en la formación de trihalometanos, a medida que aumenta la capacidad de conducción eléctrica, también la formación potencial de TTHM's, como se puede observar en la figura 16.

Figura 17. Conductividad eléctrica

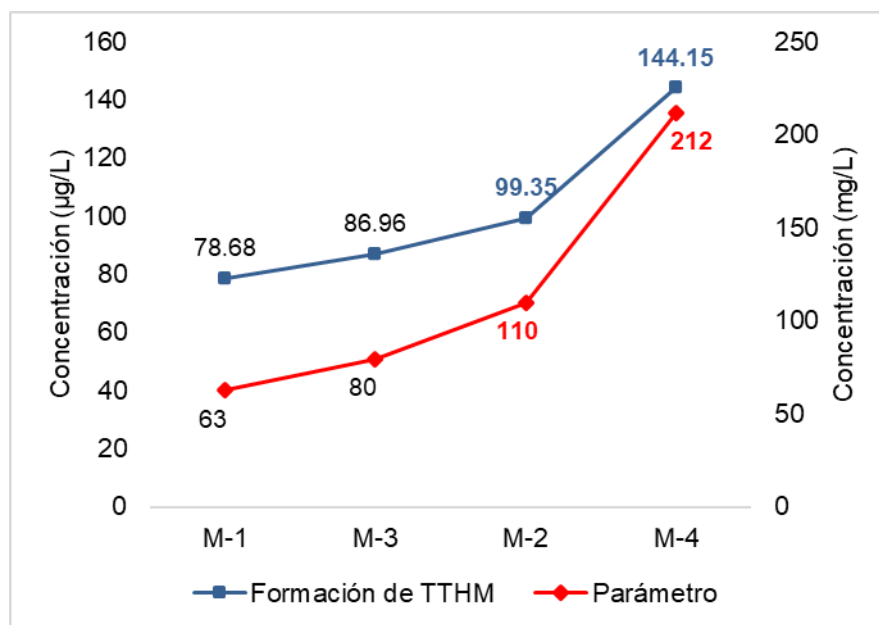


Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Sólidos disueltos

Los resultados son:

Figura 18. Atribución de los S.D. en la formación de TTHM's



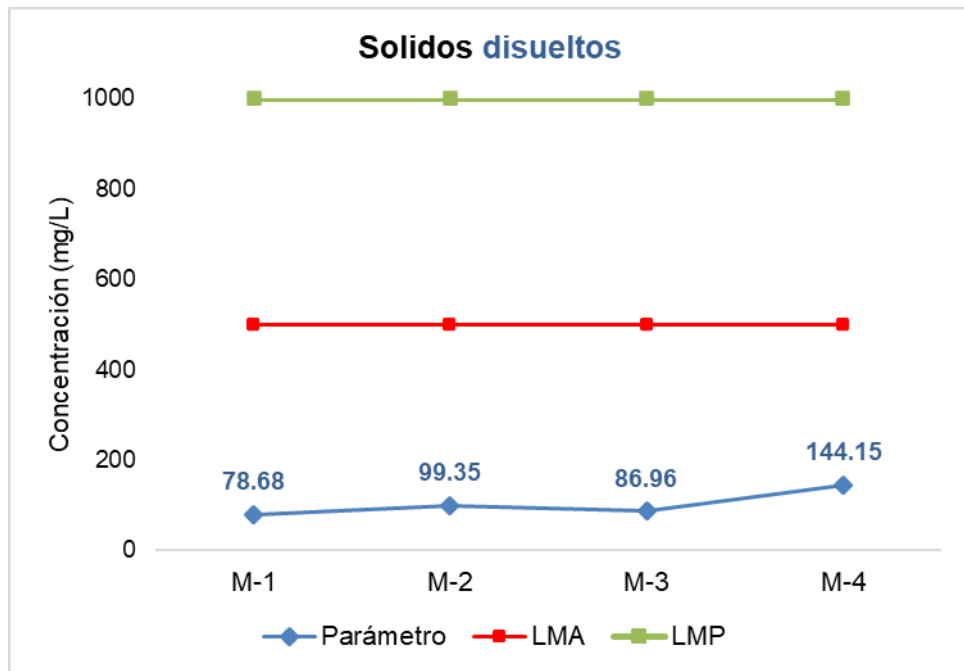
Fuente: elaboración propia.

Por su relación directa con la conductividad eléctrica, gráficamente se observa la poca variación en la formación de TTHM's, esto por la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, la materia orgánica natural y el carbón orgánico disuelto, sólidos evaporados durante el proceso y las reacciones químicas que se indujeron según el método de análisis para la cuantificación de los TTHM's.

De igual forma se puede observar que, a medida aumenta la concentración de sólidos disueltos, también aumenta la formación de

trihalometanos, donde los valores máximos encontrados en la M-4 y M-2 son 144 mg/L y 99 mg/L, los valores más bajos encontrados en la M-3 son 87 mg/L y M-1 con 77 mg/L, la norma COGUANOR NTG 29001 de 2013 establece LMA= 500 mg/L y LMP= 1 000 mg/L, resultados que, a pesar de estar por debajo de la norma, el incremento en la formación de TTHM's aumenta de forma lineal según la concentración de sólidos disueltos presentes.

Figura 19. **Sólidos disueltos**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se comprobó afirmativamente la hipótesis debido a que existe presencia de TTHM's en concentraciones mayores a 80 µg/L en las aguas subterráneas de la Ciudad de Guatemala. En las muestras M-3 y M-4 con valores de 110 y 212 µg/L, respectivamente, mientras que las muestras M-1 con 63 µg/L, por debajo del LMP, y la M-2 en el valor límite de 80 µg/L.
2. El incremento de TTHM's en las muestras de agua está atribuido a las variaciones del pH, cloro residual, el tiempo de contacto, la conductividad eléctrica y sólidos disueltos. A mayores concentraciones de dichos parámetros se incrementan los niveles de los TTHM's.
3. Es un hecho que el cloro genera formación de subproductos derivados de la desinfección como los TTHM's, este incremento se vio favorecido por las concentraciones de precursores orgánicos y las características fisicoquímicas que presentó cada una de las muestras.
4. Con base en los resultados obtenidos de TTHM's existe la probabilidad de que el consumo de agua en las muestras M-2 y M-4 produzca efectos en la salud de las personas como mutagenicidad, teratogenicidad, carcinogenicidad, especialmente el cáncer de vejiga.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un monitoreo constante y caracterización de las aguas subterráneas previo a un proceso de desinfección para saber si estas aguas de origen subterráneo ameritan la aplicación de un agente desinfectante como el cloro que se está utilizando y está formando subproductos potenciales de la desinfección como los TTHM's.
2. De ser necesario un proceso de desinfección por la presencia de sustancias o microorganismos que puedan afectar la salud de las personas, se recomienda el uso de monocloraminas, ozono, dióxido de cloro, iones de cobre-plata o luz UV, como agentes o procesos desinfectantes en las aguas subterráneas que están siendo servidas a la población para así evitar la formación de TTHM's.
3. De no ser posible sustituir el cloro como agente desinfectante es necesario eliminar los precursores orgánicos con procesos de pretratamiento como la preoxidación, tratamiento biológico y filtración lenta con arena, luego con carbón activado biológicamente por adsorción, coagulación y filtración previa a la adición de cloro. De esta forma se incrementará la eficiencia del cloro residual y paralelamente se minimiza los porcentajes de riesgo al limitar esa formación de TTHM's.
4. El uso de quitosana después de los procesos de coagulación es una alternativa comúnmente utilizada en la República de Nicaragua para la disminución de sustancias húmicas y fúlvicas, reduciendo en un 63 % las concentraciones de trihalometanos totales.

5. En la República del Ecuador el uso de carbón activado con propiedades biocidas (poliyoduros, varios átomos de yodo enlazados) es una tecnología utilizada como desinfectante, por las propiedades de absorción y la acción desinfectante del yodo, proceso que no genera trihalometanos.
6. Que futuros estudiantes de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), abran nuevas líneas de investigación enfocadas en demostrar mediante procesos convencionales la remoción de los precursores orgánicos que influyen en la formación de los TTHM's.
7. Abrir nuevas líneas de investigación enfocadas en determinar la influencia de la materia orgánica natural (MON) en la formación de trihalometanos totales u otro subproducto de la desinfección, ya sea por el método de medición de absorción UV254nm o Hach 10054, medición de la materia orgánica total (TOC) mediante el método Hach BioTector B3500, y medición del carbón orgánico disuelto (DOC) mediante el método Hach 10129. DR Hach 1900, 2700, 2800, 3800 o 6000.
8. Convenio de confidencialidad entre la ERIS y los entes encargados de la distribución de agua subterránea de la Ciudad de Guatemala, mediante el cual los investigadores tengan acceso directo a la toma de muestra para así poder analizar el comportamiento de formación de subproductos de la cloración con respecto a la dosis y el tiempo de contacto.

BIBLIOGRAFÍA

1. ADACHI, A.; KOBAYASHI, T. *Comparison of trihalomethane in tap water with and without activated carbon adsorption during the preparation process of tap water*. Kobe. Environmental Contamination and Toxicology. 1994. pp. 440-443.
2. BRACHO, Nibis; CASTILLO, Javier; VARGAS, Luis. y MORALES, Ricardo. *Formation of trihalomethanes during the disinfection process in the potabilization of water*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Zulia. Maracaibo. 2009, pp. 5-13..
3. CAPRE. *Normas de calidad del agua para consumo humano*. Revista. Norma regional. San Josa, Costa Rica. 1993. 27 p.
4. Comisión Guatemalteca de Normas. *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones*. Guatemala: COGUANOR, 2013. 12 p.
5. _____. *Agua Potable. Especificaciones*. Guatemala: COGUANOR, 1985. 15 p.
6. ENOHSA. *Desinfección de sistemas de agua potable en Argentina. Guías para la presentación de proyectos de agua potable*. Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento de la República Argentina. La Plata. 2019. 68 p..

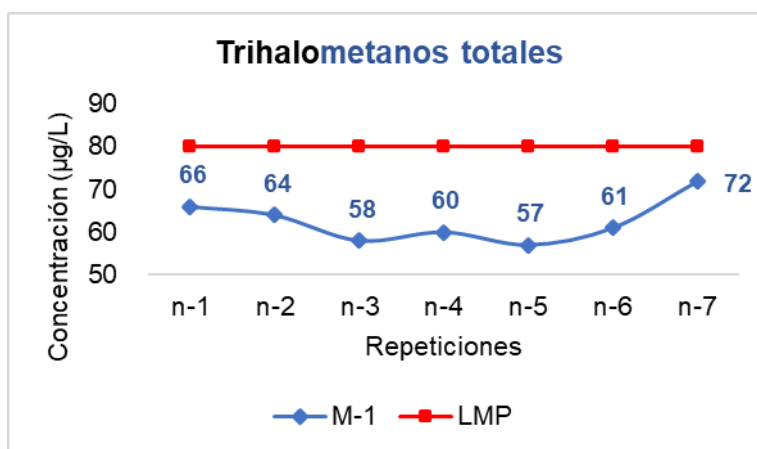
7. GAMBOA, David. *Modelamiento matemático de las concentraciones de trihalometanos en la red matriz del acueducto de Bogotá*. Trabajo de maestría, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. Colombia. 2004. 68 p.
8. Hach Company. *Trihalometanes: THM PLUS Method 10132*. Colorado: HACH, 2017. pp. 2-8.
9. HIRIART, Marisa; HERNÁNDEZ, Eugenio; y ROJO, Francisco. *Trihalometanos y haloácidos en agua de la zona sur de la Ciudad de México*. Revista de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Xochimilco. 1999. pp.5-6.
10. IRO EVLAMPIDOU, L.; et al. *Trihalomethanes in drinking water and bladder cancer burden. Environmental Health Perspectives*. Barcelona. 2019. vol. 128 (1). pp. 9-10.
11. KRASNER, Stuart; KARAFANTIL, Tanju; WESTERHOFF, Paul. *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. American Water Works Association. Denver. 2008. vol. 995. 77 p.
12. MELENDRERAS, Fuensanta. *Estudio sobre la formación de trihalometanos en la fase de transformación en procesos auxiliares*. Tesis de Doctorado, Universidad de Murcia. Facultad de Química, España. 2015. 196 p.

13. MONTERO, Virginia; *et al.* Evaluación en el agua para consumo humano y los subproductos de cloración y su relación como inductores de mutagénesis (mutaciones celulares). Revista Dialnet San Jose. 2017. vol. 27(1). [en línea] <<https://dialnet.unirioja.es/>>. [Consulta: 3 de agosto de 2019].
14. MORA, Darner; CHAMIZO, Horacio; y MATA, Ana. *Cáncer gástrico en Costa Rica: ¿Existe o no relación con la cloración del agua para consumo humano?* Revista Costarricense de Salud- Publica, Costa Rica. 2007. vol. 15 n.30. [en línea] <<https://scholar.google.es/>>. [Consulta: 25 de febrero de 2015]
15. Organización Mundial de la Salud. *Guía para la calidad de agua potable*. Normas para la calidad del agua de consumo humano. Ginebra. OMS. 2006. vol. 1(3). 393 p.
16. RÍOS, Danilo. *Riesgos biológicos y subproductos de la desinfección*. Trabajo de maestría, Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Ingeniería. Montevideo. 1986. 140 p.
17. RODRÍGUEZ, Sindy; LOZADA, Patricia; VÉLEZ, Camilo; CADAVID, Diana y RIVERA, Juan. *Efecto del punto de cloración sobre la formación de trihalometanos en procesos convencionales de potabilización de agua*. Revista Ingeniería Universidad de Medellín. Colombia. 2012. vol. 11(20). [en línea] <<https://revistas.udem.edu.co/>>. [Consulta: 28 de octubre de 2019]

18. SÁNCHEZ, Carlos; GONZALES, Luis; ARMENDÁRIS, Carlos. *Trihalometanos en agua de consumo humano*. Revista Higiene y Sanidad Ambiental. Granada. 2011. vol. 28(2). [en línea] <<https://www.redalyc.org/>>. [Consulta: 23 de agosto de 2019]
19. SANZ, Joan.; ORTEGA, Manuel.; REYES, Ortiz.; VELARDE, Julio.; Gallego, Efraín.; ZELEDÓN, Óscar. *Aplicación de floculantes naturales a la producción de agua potable en procesos de decantación lastrada y formación de trihalometanos en la planta de los Laureles*. Revista Veolia Water Solutions & Technologies. Tegucigalpa. 2008, pp. 3-8.
20. United States Environmental Protection Agency. *National primary drinking water regulation*. Washington D.C.: USEPA, 2009. 7 p.
21. VILLANUEVA, Cristina; MANOLIS, Kogevinas; JOAN, Grimalt. *Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga*. Barcelona. 2001. Gaceta Sanitaria. pp. 48-53.
22. XIE, Youfeng. *Desinfection by products in drinking water. Formation, analisis and control*. Washington. 2004. vol. 2(2). [en línea] <<https://books.google.hn/>>. [Consulta: 13 de abril de 2019].

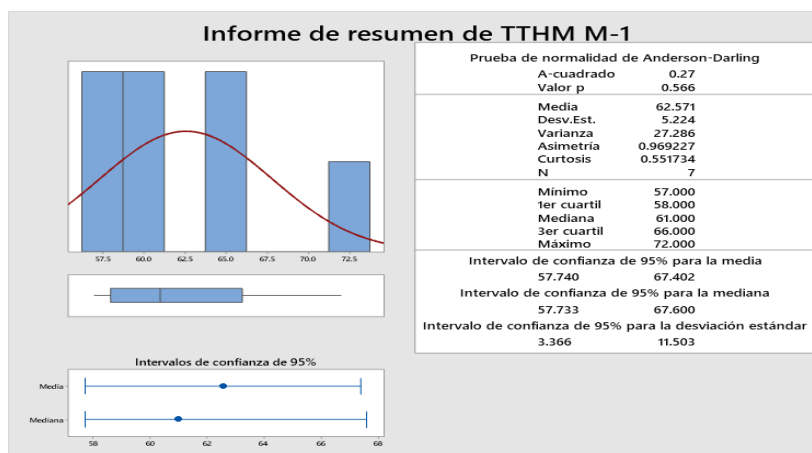
APÉNDICES

Apéndice 1. Formación de trihalometanos. Muestra 1



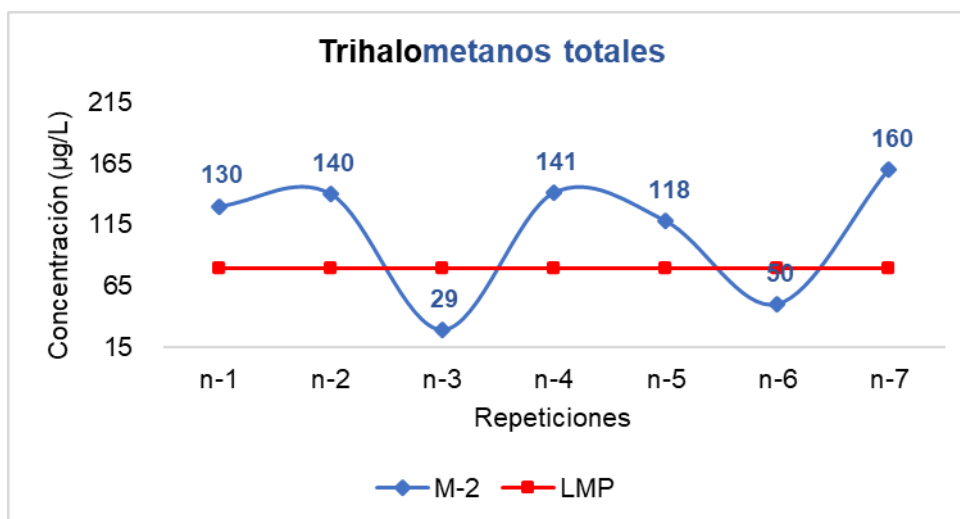
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Análisis estadístico M-1



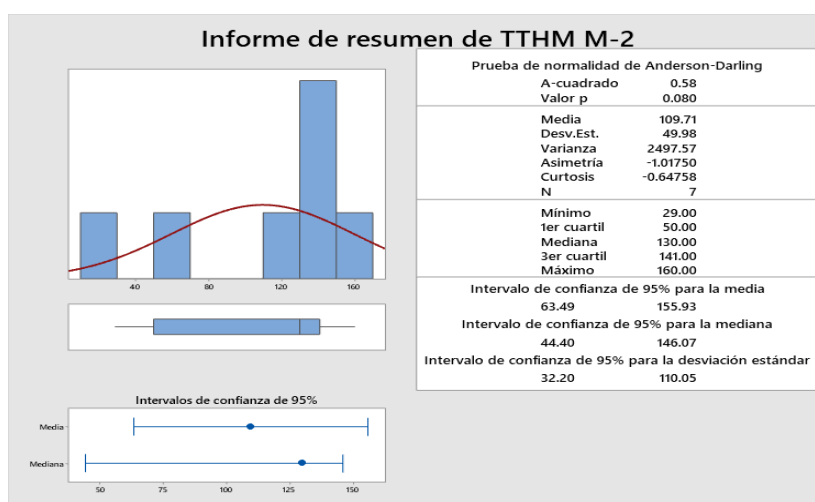
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Apéndice 3. Formación de trihalometanos. Muestra 2



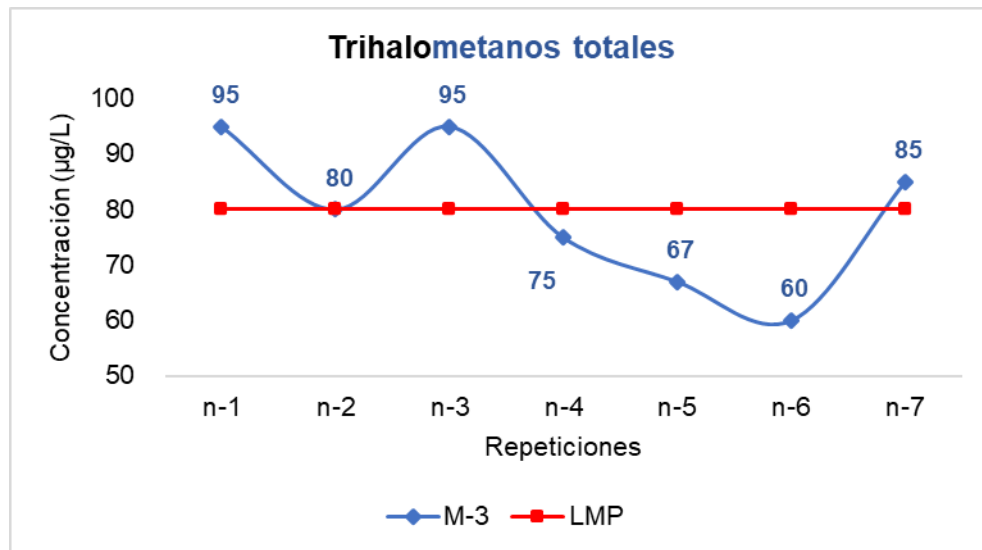
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Análisis estadístico M-2



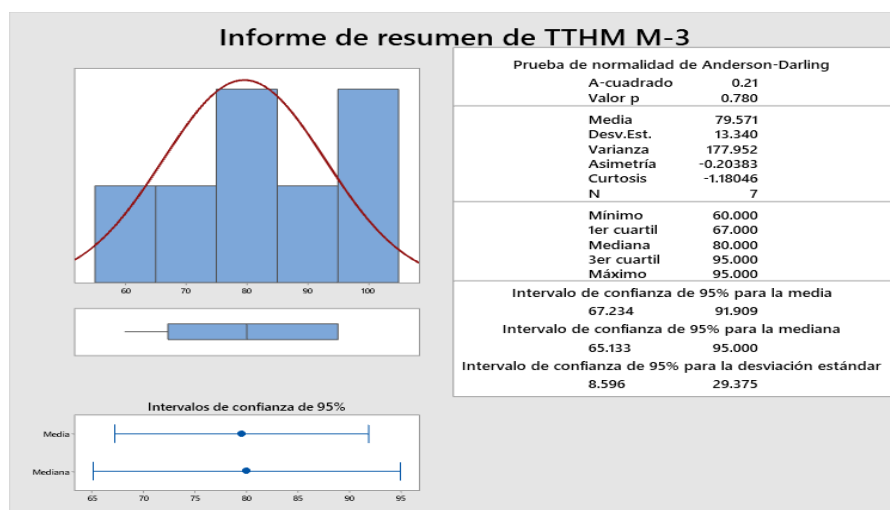
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Apéndice 5. Formación de trihalometanos. Muestra 3



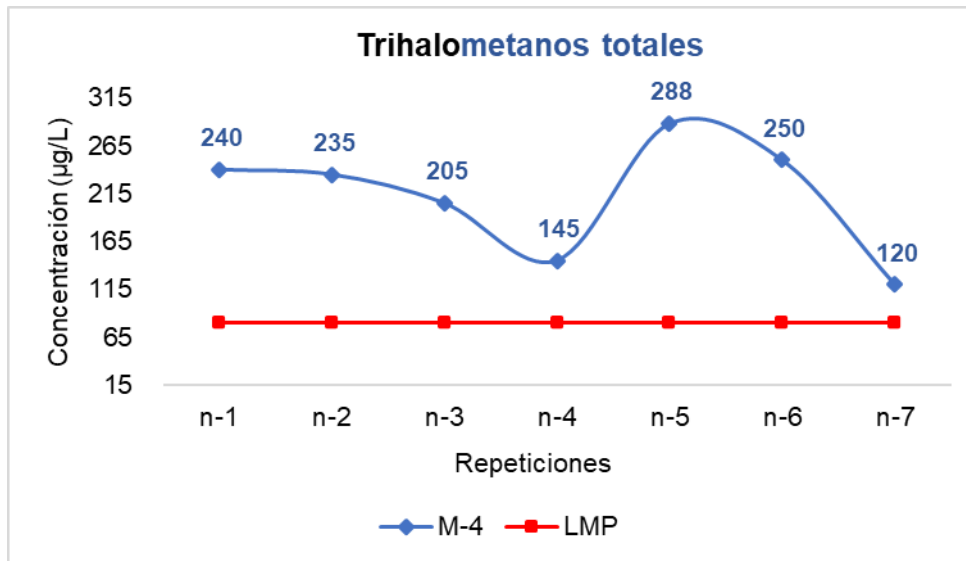
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Análisis estadístico M-3



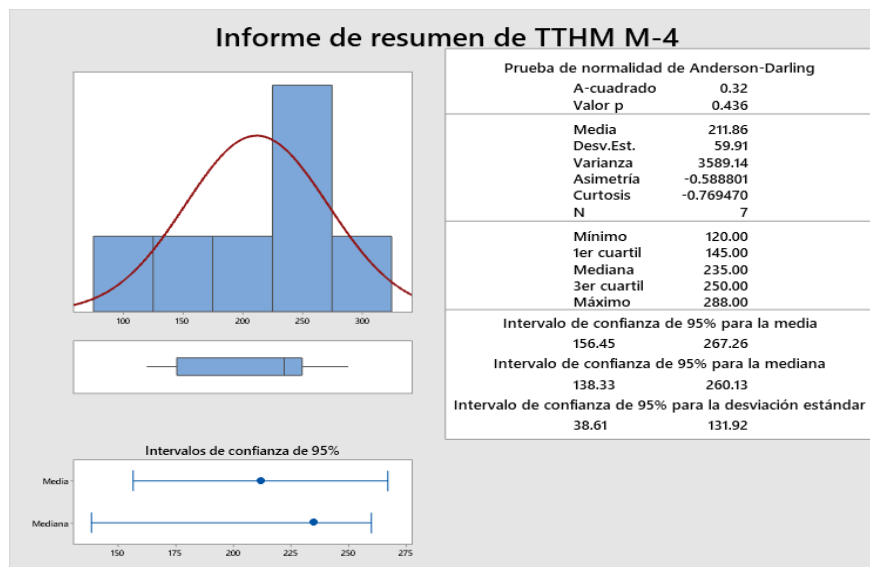
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Apéndice 7. Formación de trihalometanos. Muestra 4



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Análisis estadístico M-4



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Apéndice 9. Manual para la práctica de laboratorio

Potencial de formación de trihalometano (THMFP). Método THM Plus1 y Método 10224

- Accesorios de seguridad personal

Durante el proceso y manipulación de los reactivos y químicos utilizados para la determinación de los trihalometanos, se crean gases que son tóxicos para la salud de las personas, por lo que es necesario disponer de:

- Mascarilla
 - Guantes
 - Lentes de protección
- Equipo
 - Espectrofotómetro DR Hach 1900, programa 725
 - Potenciómetro
 - Conductívimetro
 - Kit para prueba de cloro libre y residual
 - Campana de absorción
 - Estufa
- Material
 - Tubo de ensayo con tapón de rosca
 - Celda capacidad de 50 cm³ con rosca

Continuación del apéndice 9

- Pipetas volumétricas de diferentes capacidades: (1cm³, 5 cm³, 10 cm³)
- Termómetro
- Succionador de pipeta
- Gradillas
- Químicos y reactivos
 - 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) Phosphoric acid (7664-32-2), AcidSulfurique (7664-93-9)
 - THM Plus Reagent 4 (Reactif indicateur)
- Recopilación de muestras
 - Recoge muestras en botellas de plástico o vidrio de 50 a 100 ml con tapas de rosca forradas con teflón.
 - Lentamente llenar las botellas hasta desbordar para que no se incluya aire con la muestra, ya que los trihalometanos son extremadamente volátiles.
 - Coloque las tapas en las botellas con fuerza. Invertir las botellas para asegurarse de que no hay aire en el recipiente.
 - Si no es posible realizar los análisis de inmediato:

Continuación del apéndice 9

- Introducir la muestra en una hielera a una temperatura de 6 °C, ya que la temperatura fría ralentiza la formación de THM en muestras cloradas.
 - Las muestras refrigeradas pueden conservarse durante un máximo de 14 días.
 - Para periodos más largos, agregue 1 gota de tiosulfato de sodio 0,1 N por frasco de 125 ml de muestra para declorar.
- Procedimiento:
 1. Sacar el THM Plus Reagent 2 de la refrigeradora, este debe de estar a temperatura ambiente.
 2. Una vez que el THM Plus Reagent 2 está a temperatura ambiente, saque la muestra del refrigerador y sumérjala en agua caliente durante 2 minutos.
 3. Encender el espectrofotómetro DR Hach 1900, inicie el programa 725.
 4. Encender la campana.
 5. Colocar la estufa dentro de la campana y ajuste a 300 °C.
 6. Agregue 500 mL de agua a un plato de evaporación para preparar un baño de agua caliente.
 7. Preparar otro plato de evaporación o en una cubeta y añadir 2000 mL de agua del grifo (10 a 18 °C). Mantenga la temperatura en este rango, puede añadir hielo.
 8. Preparación del blanco: tome una pipeta de 10 cm³ de agua desionizada y rellene la celda de 50 cm³.

Continuación del apéndice 9

9. Preparación de la muestra. Con la misma pipeta tomar 10 cm³ de agua de la muestra y rellene la celda de 50 cm³, tapar inmediatamente.
10. Asegúrese de etiquetar las celdas de 50 cm³ identificando el blanco y las muestras.
11. Apague la estufa y con un termómetro asegúrese de mantener la temperatura de 40 a 45 °C.
12. Añadir 3 gotas de THM Plus Reactivo 1 a cada celda de 50 cm³, tapar inmediatamente asegurándose que estén completamente apretadas.
13. Suavemente agite cada celda de 50 cm³ con movimientos de remolino tres veces para mezclar. No agite vigorosamente porque esto puede causar la pérdida de THM en el espacio en la cabeza de la celda de muestra.
14. Con una pipeta de 5 cm³, añadir 3 cm³ de THM Plus Reactivo 2 a cada celda de 50 cm³, tapar inmediatamente asegurándose que estén completamente apretadas. Evitar la agitación de la muestra cuando el reactivo es dispensado. Ya que el reactivo es viscoso y una pequeña cantidad puede permanecer en la punta por lo que es necesario evitar formaciones de burbujas de aire.
15. Mezclar completamente para asegurarse de que todo el THM entra en el líquido y no se acumulan en el aire por encima la muestra.
16. Poner las celdas de 50 cm³ en la porta celdas.
17. Con el termómetro verifique que la temperatura del agua en la estufa esté entre 40 y 45 °C.
18. Introducir las celdas en el agua caliente y mantenerlas por un tiempo de 5 minutos.

Continuación del apéndice 9

19. Sacar las muestras del baño de agua caliente. Colóquelas en plato de evaporación o cubeta que preparó en el numeral 6, asegúrese que la temperatura está entre 10 a 18 °C y mantener las muestras sumergidas en el agua fría durante 1 minuto.
20. Saque las muestras del agua fría, tome una pipeta de 1 cm³ y vierta 1cm³ de THM Plus Reactivo 3, en cada celda incluyendo el blanco. Las celdas empezarán a calentarse por lo que debe tener listo el plato de evaporación con agua a una temperatura de 10 a 18 °C, asegurándose que el nivel del agua no llegue hasta el tapón de las celdas de 50cm³. No agitar y dejar reposar por 3 minutos.
21. Hasta aquí, este procedimiento debe de hacerse dentro de la campana.
22. Sacar la portacelda del agua fría y añadir el contenido de THM Plus Reactivo 4 Almohada en polvo para cada celda, tape y asegúrese que estén bien apretadas.
23. Agitar la celda hasta que todo el polvo se disuelva completamente y deje reposar por 15 minutos. (Solo cuenta con 30 minutos de aquí en adelante para poder leer en el espectrofotómetro, pasado ese tiempo los análisis serán nulos).
24. Verter el blanco preparado en el tubo de ensayo, taparlo, con papel toalla limpiarlo y ponerlo en el espectrofotómetro, calibrar en cero. Verter la muestra preparada en el tubo de ensayo, taparlo, con papel toalla limpiarlo y ponerlo en el espectrofotómetro, Pulso LEER. Resultados mostrados en ppb CHCL₃

Fuente: Hach Company. *Trihalometanes: THM PLUS Metod 10132*. Colorado. HACH, 2017. pp. 2-8.

Continuación del apéndice 9



Fuente: elaboración propia, realizada en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria
Dra. Alba Tabarini Molina, USAC.