



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 (TTHMS) COMO
SUBPRODUCTO DE LA DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE
AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO**

Ing. Alvaro Francisco Ramírez Vásquez

Asesorado por el Msc. Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, agosto de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHMS) COMO
SUBPRODUCTO DE LA DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE
AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO**

ESTUDIO ESPECIAL

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

ING. ALVARO FRANCISCO RAMÍREZ VÁSQUEZ
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, AGOSTO 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	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	Msc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Msc. Ing. Jorám Matías Gil Larroj
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 (TTHMS) COMO
SUBPRODUCTO DE LA DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE
AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO**

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.



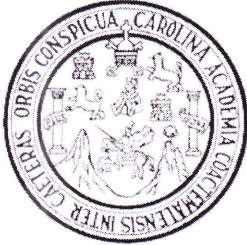
Ing. Alvaro Francisco Ramírez Vásquez

Correo electrónico: rvalvarof@gmail.com

Carné No. 201212689

Guatemala, 04 de junio de 2020

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

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), como subproducto de la desinfección
en el proceso de potabilización de agua superficial para
consumo humano".**

Elaborado por el Ingeniero Álvaro Francisco Ramírez
Vásquez 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. Zenon Much Santos
Asesor del estudio





Guatemala, 10 de agosto 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 (TTHMS) COMO SUBPRODUCTO DE LA
DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE
AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO**

Presentado por el estudiante:

Ing. Alvaro Francisco Ramírez Vásquez

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

Guatemala, 12 de agosto de 2020

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 Laroj, 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. Alvaro Francisco Ramírez Vásquez, titulado: **DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE TRIHALOMETANOS TOTALES (TTHMS) COMO SUBPRODUCTO DE LA DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL PARA CONSUMO HUMANO.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los doce días del mes de agosto de 2020.

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

César Ramírez y Sandra Vásquez.
Su amor y apoyo han sido los pilares
de mi formación.

Mis hermanos

César, Andrea y Mirella Ramírez.
Compañeros de vida y soporte
fundamental para mi superación.

Mi abuela

Estanislada López. Le deseo con
todo el amor que le profeso haya
encontrado la paz y descanso que
tanto se merecía en vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Alma mater, incubadora de mi conocimiento.

**Escuela Regional de
Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos**

Por ser la meca del conocimiento de una de mis mayores pasiones profesionales: la ingeniería sanitaria.

**Mis compañeros de la
ERIS**

Con los que he compartido tanto a lo largo de este viaje. Sus experiencias, apoyo profesional y personal han sido de gran provecho para mi crecimiento individual.

Msc. Ing. Zenón Much

Excelente catedrático, gran asesor y un enorme amigo. Con el respeto que de sobremanera se merece, su grandeza humana y abismal humildad me han enseñado mucho como profesional, y las circunstancias me han presentado la oportunidad de conocer a un gran amigo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
ANTECEDENTES.....	XXV
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Subproductos de la desinfección SPD	1
1.2. Factores que influyen en la formación y concentración de THMS	2
1.3. Riesgos y toxicidad.....	3
1.4. Regulación y concentraciones permitidas	4
1.5. Prevención de la formación de THMS	5
1.6. Detección de THMS	6
1.7. Cloroformo.....	7
1.7.1. Toxicología del cloroformo.....	7
1.8. Bromoformo.....	8
1.9. Dibromoclorometano	8
1.10. Bromodiclorometano	8

1.11.	Valores que intervienen en la formación de THMS	9
1.12.	Cloración	9
1.12.1.	Fase AB.....	10
1.12.2.	Fase BB: A	11
1.12.3.	Fase B'C.....	11
1.13.	Materia orgánica natural.....	11
1.14.	Los iones de bromuro.....	12
2.	METODOLOGÍA	15
2.1.	Sitio de estudio.....	15
2.2.	Determinación del número de muestras.....	16
2.2.1.	Distribución de probabilidad binomial.....	16
2.2.2.	Ensayo binomial aplicado.....	17
2.2.2.1.	Acierto	17
2.2.3.	Medición de parámetros.....	19
2.2.3.1.	Parámetros de medición.....	19
2.2.3.2.	Toma de muestras	20
2.2.4.	Pruebas de laboratorio	20
2.2.4.1.	Material y equipo	21
2.2.5.	Reactivos utilizados para la medición	23
2.3.	Normas de calidad del agua y valores normados de THMS	23
3.	RESULTADOS.....	27
3.1.	Fuentes A, B y C	27
3.2.	Resultados globales	29
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33

CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	43
APÉNDICE.....	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Evolución de la cantidad de cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido.....	10
2.	Localización de fuentes de muestreo.....	15
3.	Gráfico de la distribución binomial.....	19
4.	Equipo de laboratorio.....	21
5.	Preparación de muestras.....	22
6.	Muestras para lectura y blanco.....	22
7.	Cloro residual.....	29
8.	Potencial de hidrógeno.....	30
9.	Conductividad eléctrica.....	30
10.	Sólidos disueltos.....	31
11.	Temperatura.....	31
12.	TTHMS.....	32
13.	Relación cloro residual – producción de TTHMS.....	33
14.	Relación nivel de pH – producción de TTHMS.....	34
15.	Relación conductividad eléctrica – producción de TTHMS.....	34
16.	Relación sólidos disueltos – producción de TTHMS.....	35

TABLAS

I.	THMS más comunes.....	1
II.	Valores guía para THMS en agua para consumo.....	5

III.	Reducción de los niveles de THM en aguas mediante el empleo de distintas técnicas.....	5
IV.	Efecto del TOC y la concentración de bromuros en la formación de THM's	13
V.	Análisis de casos probabilísticos	18
VI.	Definiciones probabilísticas	18
VII.	Materiales y equipo de laboratorio	21
VIII.	Criterios de calidad de agua normados para consumo humano.....	24
IX.	Resultados de laboratorio: fuente A.....	27
X.	Resultados de laboratorio: fuente B.....	28
XI.	Resultados de laboratorio: fuente C.....	28
XII.	Resultados de laboratorio promedio	29

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
TOC	Carbono orgánico total
C.E.	Conductividad eléctrica
DBPS	Derivados de los subproductos
L	Litros
LMA	Límite máximo admisible
LMP	Límite máximo permisible
MON	Materia orgánica natural
µg	Microgramo
Mg	Miligramo
ml	Mililitro
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
S.D.	Sólidos disueltos
T°	Temperatura
THM	Trihalometanos
TTHMS	Trihalometanos totales

GLOSARIO

Ácidos acéticos halogenados

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).

Agua potable

Agua que puede ser consumida sin restricción debido a que, gracias a un proceso de potabilización, no representa un riesgo para la salud.

Cloro

Elemento químico gaseoso de color verde amarillento y olor sofocante, muy venenoso, fácilmente licuable, muy abundante en la corteza terrestre en forma de cloruros en el agua de mar, en depósitos salinos y en tejidos animales y vegetales, usado para blanquear, como plaguicida, en la desinfección de aguas y en la industria de los plásticos

Cloro libre residual

Remanente del cloro en el agua después de que parte del añadido reaccione en el proceso de desinfección de esta.

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.
Concentración	Magnitud que expresa la cantidad de una sustancia por unidad de volumen (p. ej. mg/L).
Desinfectante precursor	Originados 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.
Hipoclorito y ácido hipocloroso	Son las formas en las que se encuentra el hipoclorito de sodio añadido al agua.

**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.

Oxidante

Compuesto químico que oxida a otras sustancias en una reacción. El hipoclorito de sodio o lejía es un oxidante de la materia orgánica entre la que se encuentran los microorganismos.

pH

Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución. Entre 0 –7 la disolución es ácida, y de 7 –14 es básica.

RESUMEN

En este estudio se examinaron los efectos del pH, cloro residual y materia orgánica (sólidos disueltos) como agentes precursores en el desarrollo de thihalometanos en agua tratada para consumo humano. La base experimental de la investigación se concentra en la presencia de TTHMS en concentraciones mayores a 80 µg/L de fuentes que abastecen a la Ciudad de Guatemala y que potabilizan agua proveniente de flujos superficiales.

Se identificó una relación directa entre el nivel de pH, cloro residual, tiempo de contacto, conductividad eléctrica y sólidos disueltos en la formación de TTHMS, acrecentando la formación cuando los niveles anteriores son altos.

Se evaluaron tres distintas fuentes de distribución de agua en las que se realizaron 7 análisis por muestra extraída, de la información producida se analizaron los valores promedios en cada una de las muestras, presentando concentraciones de 124,86 µg/L, 127,14 µg/L y 11,14 µg/L en las fuentes A, B y C, respectivamente, lo que evidencia que en dos de los tres puntos analizados se supera el valor límite normado por las regulaciones de agua para consumo propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos USEPA (80 µg/L).

Las concentraciones de TTHMS obtenidas sugieren que existen concentraciones de precursores cancerígenos por arriba del valor recomendado en el agua para consumo en las zonas estudiadas, por lo tanto, existe la posibilidad de que esté repercutiendo negativamente en la salud de las personas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua que se encuentra en cauces naturales superficiales no suele cumplir con los requerimientos sanitarios que garanticen un consumo seguro. Usualmente en los nacimientos de los ríos se puede encontrar agua con las condiciones adecuadas, sin embargo, conforme avanza su trayecto en el cauce encuentra elementos contaminantes tanto naturales como antropogénicos, por lo tanto, lograr abastecer de agua para consumo a grandes ciudades requiere obligatoriamente un proceso de depuración y mejoramiento de la calidad que solo un sistema de tratamiento de agua puede brindar.

Según estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS), hasta la década de 1990 las enfermedades relacionadas con el consumo de agua y la mala disposición de aguas servidas y excretas se encontraban entre las tres principales causas de muerte a nivel mundial.

El empleo del cloro para la desinfección de agua para consumo humano es una de las prácticas con mayores impactos en la sanidad mundial, sin embargo, el desafío que enfrenta la cloración es poder lograr obtener los máximos beneficios de su implementación con un mínimo impacto ambiental y toxicidad de sus subproductos. No existe razón alguna que ponga en juicio la aplicación del cloro como desinfectante en el proceso de potabilización del agua, el problema se encuentra en lograr comparar y evaluar el riesgo de su toxicidad como un precursor cancerígeno gracias a la generación de subproductos de la desinfección en contraste con los beneficios que se obtienen en el control de enfermedades transmitidas por el agua.

Guatemala cuenta en la actualidad con una normativa de calidad de agua para consumo humano que ha suprimido los subproductos de la desinfección, trihalometanos, lo cual abre una brecha en la que cabe la incertidumbre de la posible generación de sustancias potencialmente cancerígenas y con ello el escenario de que la población esté expuesta a tal padecimiento. Los requisitos sanitarios, la sanidad y control de contaminantes requieren que existan prácticas de monitoreo que consideren dichos parámetros y de esta manera poder tomar acciones sobre la calidad del agua que puedan asegurar lograr alcanzar las condiciones sanitarias que se buscan.

Actualmente no han sido publicados estudios relacionados con la producción de subproductos de la desinfección en las líneas de tratamiento de agua para consumo en Guatemala, por lo que toma mayor relevancia el poder determinar si efectivamente se están produciendo en concentraciones peligrosas precursores cancerígenos como los trihalometanos totales (TTHMS). Es decir, ¿se estarán generando trihalometanos totales en el proceso de potabilización del agua que puedan estar impactando negativamente en la salud de las personas?

JUSTIFICACIÓN

En el último siglo la salud pública ha sido testigo de grandes avances en la prevención de enfermedades transmitidas por el agua como resultado de la implementación del cloro como agente desinfectante. La cloración es considerada una medida sanitaria necesaria para garantizar la inocuidad microbiológica del agua (OMS). Enfermedades como el cólera, la disentería y la tifoidea han sido controladas gracias a la desinfección.

Utilizar el cloro como materia prima para la producción de desinfectantes genera significativas ventajas reflejadas en el costo, puesto que son más baratos, hay disponibilidad, dado que son fáciles de obtener, efectivos y trazables, por su alto porcentaje de eliminación de patógenos (99,99 %) y un comportamiento conservativo por su carácter residual que lo hace detectable a lo largo de las redes de distribución. Sin embargo, en los últimos cuarenta años han sido descubiertas ciertas desventajas a causa de los subproductos que se obtienen de la cloración del agua cuando esta no se encuentra en buenas calidades para la desinfección, como la presencia de materia orgánica, además de la aparición de patógenos transmitidos por el agua como el *cryptosporidium* y la *giardia*, que poseen mayor resistencia a las prácticas tradicionales de desinfección.¹

Desde hace más de 15 años se ha estado estudiando las posibilidades de reacción del cloro con la materia orgánica en el agua potable y la formación de compuestos clorados peligrosos, llamados subproductos de la desinfección. Los trihalometanos (THM) son compuestos derivados del metano en donde tres de los

¹ REILLY, Alan. *Documento de debate sobre la utilización del agua clorada*. p. 2.

cuatro átomos de hidrógeno del metano se reemplazan por átomos de halógenos, comúnmente el cloro, bromo o, incluso, una combinación de ambos. Cuando se habla de trihalometanos se hace referencia generalmente al triclorometano, bromodiclorometano, clorodibromometano y tribromometano. Estos compuestos, volátiles y tóxicos, no fueron identificados hasta 1974. El cloroformo, por su propia naturaleza de interacción química, es el más importante de los tres al representar la mayor fracción cuando son detectados como TTHMS.

El agua para consumo humano es la principal fuente de exposición a THMS, además, numerosos estudios toxicológicos han clasificado a los THMS como sustancias cancerígenas relacionadas con el desarrollo de varios tipos de cáncer, entre ellos de vejiga y colon.

Conociendo el enorme impacto que ha generado a la sanidad pública la detección de trihalometanos en agua para consumo humano, se ha generado la necesidad de saber si en los procesos de potabilización y en las redes de abastecimiento de agua para consumo humano se están produciendo dichos compuestos de características tóxicas. La vigente normativa reguladora de la calidad de agua para consumo humano, COGUANOR NTG 29001 (2013), se encuentra exenta de la delimitación de tales parámetros, sin embargo, en la anterior versión de dicha normativa técnica, COGUANOR NGO 29001:99 (1985), en el punto 10: productos secundarios de desinfección, tabla 15: valores guía para productos secundarios de la desinfección, se regulan los valores permisibles para asegurar un nulo impacto en la salud.

Por lo tanto, la determinación de los subproductos de la desinfección (TTHMS) está justificada y resulta de suma importancia para la valorización y concientización de las regulaciones de calidad en los proceso de tratamiento del agua para consumo humano, además del conocimiento del riesgo que

posiblemente existe debido a la exposición que puede estar sufriendo la población ante agentes dañinos a la salud (TTHMS).

De confirmarse la ausencia de subproductos de la cloración en las redes de distribución, la población puede estar segura de la calidad del agua que consume, o por el contrario, al detectarse concentraciones de TTHMS, se pueden tomar acciones para elevar la calidad del agua que está siendo tratada para consumo.

OBJETIVOS

General

Determinación de la presencia de trihalometanos (THM) en la forma de trihalometanos totales (TTHMS) en sistemas de tratamiento y distribución de agua para consumo humano que utilicen el cloro en su etapa de desinfección en la Ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Desarrollar el método de laboratorio TTHMS 10132: calentamiento indirecto, para la determinación de pruebas de potencial formación de TTHMS en agua potable.
2. Identificar las condiciones físicas y ambientales que afectan la generación de TTHMS y validar en la experimentación si se produce dicha relación causa-efecto en las muestras analizadas.
3. Determinar si los niveles detectados de TTHMS sobrepasan los límites de calidad establecidos en las normas de agua para consumo humano por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).
4. Describir las acciones o alternativas dentro del proceso de potabilización que permitan la reducción de los niveles de concentración de TTHMS en agua potable.

HIPÓTESIS

Existe presencia de trihalometanos (THM) en forma de trihalometanos totales (TTHMS) en concentraciones mayores a 80 µg/L en agua para consumo humano proveniente del proceso de potabilización de agua de fuentes superficiales.

ANTECEDENTES

La implementación de productos derivados del cloro utilizados para la desinfección presenta múltiples beneficios dentro del proceso de tratamiento de agua para consumo humano, generando un impacto positivo en la salud pública. Sin embargo, recientemente numerosos estudios señalan indicios sobre una posible relación causal existente entre la desinfección del agua utilizando cloro y efectos adversos a la salud a largo plazo, específicamente el desarrollo de distintos tipos de cáncer producido por un agente contaminante y tóxico transportado en el agua.

Unos de los primeros estudios dirigidos a evaluar la posible relación entre el cáncer y la calidad del agua potable se realizaron en Estados Unidos en la década de 1970², un conjunto de investigaciones descriptivo-geográficas y epidemiológico-analíticas. Estos estudios presentan considerables diferencias en su diseño y metodología, lo cual quiere decir que se limita la comparación de resultados y posibles asociaciones de casos de cáncer con el consumo de agua clorada.

En España, de marzo de 1991 a febrero de 1992, se informó que en los países vascos fueron detectadas concentraciones promedio dentro del rango de 3,6 a 7,4 µg/L de trihalometanos totales (TTHMS). La mayor concentración se hallaba en el dibromoclorometano, seguido por el diclorobromometano y el cloroformo³.

² RAM, Newman; CHRISTMAN. Randy; CANTON, Keneth. *Significance and treatment of volatile organic compounds in water supplies*. pp. 103-127.

³ IBARLUZEA, Jesús; GOÑI, F.; SANTAMARÍA, J. *Trihalomethanes in water supplies in the San Sebastian Area, Spain*. p. 414.

En Japón, de 1994 a 1995, se realizó una investigación sobre la incidencia de trihalometanos (THM) en la línea de abastecimiento de agua potable a la población. Los resultados describieron concentraciones en el rango de 7 a 72 µg/L de TTHMS. Los compuestos con mayor incidencia detectados fueron el cloroformo seguido del bromodiclorometano⁴.

En México, de octubre de 1993 a septiembre de 1994, se analizaron niveles de THM en fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en 15 estaciones de Cancún, Quintana Roo, y en Guadalajara, Jalisco. Las concentraciones detectadas varían en el rango de 0,4 a 75,7 µg/L, con una mayor concentración promedio de bromodiclorometano de 27,6 µg/L⁵.

En Estados Unidos, en 1995, la Agencia de Protección Ambiental (US EPA por sus siglas en inglés) detectó doce sistemas de abastecimiento, en diferentes estados, que frecuentemente sobrepasaban el límite máximo permisible de 100 mg/L de TTHMS regulado por dicha institución⁶.

En Venezuela, del 2000 al 2001, se realizó un estudio sobre la concentración de THM en el agua para consumo humano suministrada por las redes de distribución de los dos principales sistemas de potabilización de agua del estado de Carabobo. Se encontraron concentraciones de TTHMS desde 47,84 hasta 93,23 µg/L, con una alarmante concentración arriba de los 80,00 µg/L regulados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos,

⁴ ADACHI, A.; KOBAYASHI, T. *Comparison of trihalomethanes in tap water with and without activated carbon adsorption during the preparation process of tap water*. p. 441.

⁵ GELOVER, Silvana.; BANDALA, Erick; LEAL-ASENSIO, Teresa; PÉREZ, Sixto.; MARTÍNEZ, Evaristo. *GC-MS Determination of volatile organic compounds in drinking water supplies in Mexico*. p.135

⁶ United States Environmental Protection Agency. *Safe drinking water information system*. p. 857.

confirmando la existencia del riesgo a sufrir efectos adversos para la salud como consecuencia del consumo de agua desinfectada con cloro⁷.

En España, en 2008, un estudio recopilatorio de los efectos de los THM en la salud detalló la posible relación detectada entre subproductos del cloro y el riesgo de desarrollar cáncer de vejiga y colon. Los resultados fueron inconclusos, sin embargo, la misión del estudio se concentró en resaltar la necesidad de normalización, del diseño y metodología, de esta clase de estudio para que pueda existir un mejor manejo de la información que permita identificar cualquier tipo de correlación entre ambas variables, y así brindar validez a estudios realizados en futuras investigaciones⁸.

En Nicaragua, en 2010, se llevó a cabo un estudio de la fracción de materia orgánica de mayor remoción en el proceso coagulación-floculación en agua superficial, en el cual se encontraron concentraciones de THM del orden de 89 a 166 µg/L, en aguas para consumo humano luego de ser desinfectadas utilizando productos del cloro⁹.

En la ciudad de Pamplona, España, en 2011, se llevó a cabo un estudio sobre la presencia de trihalometanos en aguas para consumo humano donde se expone su toxicidad y los posibles daños que representa a la salud la exposición en concentraciones altas de THM. Se detalla el caso del bromodiclorometano y el bromoformo, los cuales fueron declarados como parte del grupo 2B, clasificación que se le atribuye a sustancias cancerígenas en humanos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, resaltando que los

⁷ SARMIENTO, A.; ROJAS, M.; MEDINA, E.; OLIVET, C.; CASANOVA, J. *Investigación de trihalometanos en agua potable del Estado Carabobo Venezuela*. p. 141.

⁸ SÁNCHEZ, Alicia. *Efectos de los trihalometanos en la salud*. pp. 289-290.

⁹ TAPIA, A.; REYES, A.; GARCÍA, I. *Estudio de la fracción de materia orgánica de mayor remoción en el proceso de coagulación-floculación usando agua superficial*. pp. 78-80.

antecedentes estudiados señalan evidencia de cancerogenicidad en experimentos con animales¹⁰.

En Colombia, de 2013 a 2014, se evaluó la presencia de TTHMS, y otras sustancias, presentes en agua para consumo en las poblaciones de Chinú y Corozal. La mayor concentración detectada fue de 7,36 µg/L de cloroformo¹¹.

¹⁰ HERÁNDEZ, C.; GONZÁLEZ, L.; ARMENDÁRIZ, C.; CABALLERO, J.; BEN-CHARKI, E.; HARDISSON, A. *Trihalometanos en aguas de consumo humano*. pp. 111-112.

¹¹ HERNÁNDEZ, M.; MARRUGO, J. *Trihalometanos y arsénico en el agua de consumo en los municipios de Chinú y Corozal de Colombia: evaluación del riesgo a la salud*. pp. 110-112.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El presente estudio de investigación tiene por alcance determinar si la calidad del efluente de agua proveniente de procesos de potabilización en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) cumple con la cantidad admisible de trihalometanos totales TTHMS en agua para consumo humano. Para llegar a tal objetivo se extrajeron dos muestras de agua puntuales en el tanque de almacenamiento y una en la red de distribución de tres diferentes procesos de tratamiento dentro de la Ciudad de Guatemala. Posterior a la recolección se evaluaron las muestras en un tiempo no mayor a 6 días en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Trabanini de Molina, del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dentro de las limitaciones se encuentra el tiempo de transporte de los materiales, adquiridos con una empresa privada distribuidora de HATCH en Guatemala, y la entrega desde su compra en el exterior duró dos meses y medio, además que los reactivos tienen un tiempo de expiración de seis meses luego de su primer uso. Otra limitante más fue el costo de los reactivos a utilizar, por lo que la cantidad de fuentes examinadas se vio directamente relacionada con la cantidad de pruebas que se podían llegar a realizar con la inversión que se tuvo.

Por último, el que no exista ningún convenio de investigación con ninguna institución que brinde el servicio de potabilización de agua para consumo, ya sea de carácter público o privado, limita la publicación y descripción detallada de los sitios, la conformación de los proceso de tratamiento, las fuentes naturales de las que se abastecen y las zonas de la ciudad a las que se distribuye el agua tratada,

teniendo como mayor impacto la nula descripción en el apartado de metodología y resultados de la investigación.

Se espera que la información que se produzca a raíz de esta investigación sirva como punto de partida para el diálogo y trabajo interinstitucional de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos y las instituciones anteriormente citadas, en beneficio del desarrollo científico y social de la ingeniería sanitaria en el país.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Guatemala se abastece en un 42,49 % de fuentes superficiales (según balance general 2017) que pasan a través de un proceso de tratamiento para asegurar un consumo sanitariamente seguro. La Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA) cuenta actualmente con cuatro plantas de tratamiento de agua potable de fuentes superficiales activas: Lo de Coy, Santa Luisa, El Cambray y Las Ilusiones. Cada sistema de tratamiento presenta una etapa de desinfección en la que se utiliza cloro para garantizar la eliminación de patógenos, quedando sujetas a la posible formación de subproductos de la desinfección, y por lo tanto a la presencia de TTHM en el agua.

El agua superficial transporta múltiples minerales, los cuales son aportados por el suelo y arrastrados por la erosión que genera la naturaleza dinámica del recorrido, obteniendo en mayores concentraciones sustancias húmicas provenientes de las características de formación del suelo, siendo estos unos de los mayores precursores de los subproductos de la desinfección.

Como respuesta a la creciente tendencia a nivel mundial de la necesidad de conocimiento sobre la existencia de precursores cancerígenos presentes en el agua de consumo humano, se pretende determinar las concentraciones de TTHMS que se pueden estar produciendo en procesos de potabilización de fuentes superficiales y evaluar si están siendo desarrolladas en concentraciones que representen daños potenciales a la salud de las personas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Subproductos de la desinfección SPD

Se denominan subproductos de la desinfección SPD al conjunto de compuestos que se forman en el proceso de desinfección del agua. Los trihalometanos THMS son compuestos derivados del metano que se forman cuando se emplea cloro como desinfectante. Comúnmente al referirse a los THMS se hace alusión a cuatro compuestos específicos: el triclorometano (cloroformo CHCl_3), bromodiclorometano (CHBrCl_2), clorodibromometano (CHBr_2Cl) y tribromometano (CHBr_3). Estos THMS se generan involuntariamente durante el proceso de cloración del agua con presencia de materia orgánica, son volátiles y tóxicos. Se destaca entre ellos al cloroformo por ser el compuesto con mayor presencia en la formación de tales subproductos. A continuación se presentan las fórmulas y nombres de los THMS más comunes.

Tabla I. THMS más comunes

Fórmula molecular	Nombre IUPAC	Nombre común	Otros nombres
CHCl_3	Triclorometano	Cloroformo	--
CHBrCl_2	Bromodiclorometano	--	BDCM
CHBr_2Cl	Dibromoclorometano	--	DBCM
CHBr_3	Tribromometano	Bromoformo	--

Fuente: CALDERÓN, José.; *et al. Subproductos halogenados de la cloración en el agua de consumo público.* p. 242.

La tasa y grado de formación de los THMS aumentan en función de la concentración de cloro y ácidos húmicos, la temperatura, el pH y la concentración del ion bromuro. Cuando existe mayor presencia de bromuros se forman preferentemente THMS bromados y las concentraciones de cloroformo disminuyen proporcionalmente. Se presupone que la mayoría de THMS presentes en el agua se transfieren en última instancia al aire debido a su volatilidad.

1.2. Factores que influyen en la formación y concentración de THMS

La tasa de formación y concentración final de THMS en el proceso de desinfección depende de seis factores principales:

- Temperatura: manteniendo el nivel de pH y la dosis de cloro, aumentar la temperatura incrementa la posibilidad de formación del cloroformo.
- Efecto del nivel de pH: debido a la acción catalítica del haloformo, al aumentar el valor del pH del agua mayor será la cantidad de THMS.
- Cloro residual: la concentración del cloroformo aumenta directamente con el residual de cloro.
- Precusores orgánicos o sustancias húmicas: cuando el agua transporta grandes cantidades de derivados del humus, se incrementa sustancialmente la posibilidad de formación de THMS.
- Concentración de bromo en el agua: el bromo representa un constituyente natural en el agua, reacciona en presencia del cloro para formar ácido hipobromoso y a su vez este en precusores orgánicos.
- Tiempo de contacto del cloro: a mayor tiempo de contacto mayor formación de THMS, debido al efecto residual del cloro, muy probablemente en las líneas de distribución seguirán formándose al entrar en contacto con materia orgánica.

La formación de THMS no se limita exclusivamente a la fase de desinfección del agua en procesos de tratamiento. La reacción que da origen a los THMS depende de la concentración de precursores y de la dosis del cloro residual, por lo cual pueden continuar desarrollándose en el sistema de conducción y distribución de agua potable.

1.3. Riesgos y toxicidad

La exposición de THMS en mamíferos causa efectos tóxicos en el hígado, riñón, sistema nervioso y reproductivo. Estudios en animales han demostrado que el cloroformo en altas dosis es cancerígeno. Aunque diversos estudios epidemiológicos asocian a los THMS con un riesgo de cáncer de vejiga urinaria, también han sido asociados con cáncer colorrectal y defectos en neonatos de madres expuestas.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (International Agency for Research on Cancer, IARC) clasificó al cloroformo y al bromodiclorometano en el grupo 2B que incluye a las sustancias posiblemente cancerígenas en humanos. En el caso del bromodiclorometano y el bromoformo solo existen suficientes evidencias sobre su potencial cancerígeno en animales de experimentación.

El cloroformo es un sedante del sistema nervioso central. El efecto tóxico inmediato del cloroformo es la pérdida de la conciencia. La dosis letal oral del cloroformo no se ha determinado en el ser humano. Se han descrito muertes tras ingestas de 10 mL y casos de supervivencia en personas con ingestas de hasta 500 mL. Se considera que la dosis letal media del cloroformo para el hombre es de aproximadamente 44 g o 630 mg/kg de peso corporal, para una persona de 70 kg.

Respecto a los THMS bromados existe información limitada sobre sus efectos en humanos. Muy pocos estudios han examinado la asociación entre el cáncer y la exposición a los THMS bromados. Sin embargo, parece claro que la toxicidad de estos subproductos de la desinfección está relacionada con su metabolismo que ocurre por rutas oxidativas y reductoras. Los THMS bromados son considerados altamente tóxicos por ser mucho más cancerígenos y mutagénicos que los THMS clorados.

1.4. Regulación y concentraciones permitidas

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece valores guías recomendados para las concentraciones máximas individuales de cada uno de los THMS en el agua para consumo humano. Además, en la primera revisión de la Normas Guatemaltecas Obligatorias COGUANOR NGO 29001: agua potable, se han establecido valores de concentraciones conocidos como Límite Máximo Permisible (LMP) para los productos de la desinfección, aspecto posteriormente retirado en la actualización de la misma en su versión de Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 29001: agua para consumo humano.

A pesar que han sido normadas las concentraciones máximas individuales de THMS en el agua, ninguna de las mencionadas anteriormente define un límite máximo para la cantidad de TTHMS, las guías de la OMS proponen una ecuación para definir un límite con base en los criterios locales en contraste con los establecidos por la misma OMS, sin embargo las normas de calidad de agua para consumo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) sí definen un criterio para la concentración máxima de TTHMS, por lo que han sido seleccionadas para la aplicación en el presente estudio.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de ambas normativas:

Tabla II. Valores guía para THMS en agua para consumo

Parámetro	OMS LMP (µg/L)	EPA LMP (µg/L)
Bromoformo	100	60
Bromoclorometano	100	60
Bromodiclorometano	60	60
Cloroformo	300	--
TTMHs	--	80

Fuente: WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality*, p. 427. EPA. *National Primary Drinking Water Regulations*. p. 6.

1.5. Prevención de la formación de THMS

Existen técnicas tradicionales que pueden ayudar en la disminución de la formación de THMS que no solo disminuyen los niveles de THMS, sino que además ayudan a disminuir la carga microbiana en el agua para consumo humano. Además, el almacenamiento de agua puede llegar a disminuir los THMS por su volatilización, siendo mayor en recipientes que no están cubiertos a diferencia de aquellos cubiertos.

Tabla III. Reducción de los niveles de THM en aguas mediante el empleo de distintas técnicas

Técnica	Reducción de THM (%)
Ebullición (1-5 min)	68-98
Tras ebullición > 5 min	83 (cloroformo)
Filtros domésticos (de carbón activado o resina de intercambio iónico)	47
Filtros de carbón activado	93-99

Fuente: HERNÁNDEZ, C.; et al. *Trihalometanos en aguas de consumo humano*. pp. 111-112.

1.6. Detección de THMS

La determinación de THMS en agua se realiza principalmente mediante la cromatografía de gases en la cual se utilizan detectores de captura electrónica (ECD) o detectores de masa electrónica (EMD). En la actualidad se utiliza la cromatografía de gases y un detector de captura electrónica usando el método de la EPA (Agencia de Protección Ambiental Norteamericana) 551 para conocer la concentración de THMS.

La preparación de la muestra es una de las fases más delicadas del análisis y requiere una labor muy meticulosa. Por fortuna existen métodos desarrollados por empresas internacionales que proponen métodos mucho más accesibles y sencillos en comparación de los tradicionales, sin embargo se debe considerar el rango y minuciosidad de los tipos de compuestos que se puede lograr obtener. El método 10132: calentamiento indirecto o baño María, para la determinación de pruebas de potencial formación de THM, es una clara muestra de lo anteriormente mencionado, siendo este el pilar de la experimentación en la presente investigación.

El método 10132, desarrollado por la empresa HATCH®, permite medir la concentración de cloroformo en la escala de partes por billón (ppb), ya que como anteriormente se mencionó, el cloroformo es el compuesto de mayor concentración cuando existe formación de THMS y brinda una idea muy acertada de la cantidad de THMS que transporta el agua, además de poder utilizar esta información auxiliada de métodos numéricos para la predicción de la concentración de los demás elementos que conforman los THMS.

1.7. Cloroformo

Su formación en las plantas potabilizadoras está estrictamente ligada con la desinfección por medio de cloro y la presencia de materia orgánica natural (MON) presente en el agua, a mayor concentración de materia orgánica y mayores dosificaciones de cloro, mayor será la formación de este compuesto químico.

Es un líquido incoloro, volátil, de olor característico. Durante mucho tiempo fue utilizado como anestésico, pero se interrumpió a causa de su toxicidad. Actualmente se utiliza como disolvente en la industria química, pero, tal como ocurre con todos los compuestos orgánicos halogenados (principalmente flúor y cloro) en sus moléculas, su carácter de sustancias contaminantes hace que se intente restringir su consumo.

1.7.1. Toxicología del cloroformo

Las pruebas de la genotoxicidad del cloroformo, en su conjunto, han resultado negativas. El CIIC ha clasificado el cloroformo como posiblemente cancerígeno para el ser humano (Grupo 2B), basándose en la escasez de pruebas de su capacidad cancerígena en el ser humano y en la existencia de pruebas suficientes de su capacidad cancerígena en animales de experimentación. La observación de tumores hepáticos en ratones concuerda, en su conjunto, con un mecanismo de inducción con umbral. Aunque resulta verosímil que los tumores renales en ratas puedan asociarse de forma similar a un mecanismo con umbral, la base de datos presenta algunas limitaciones a este respecto. Los efectos tóxicos del cloroformo observados con mayor frecuencia son lesiones en la región centrolobulillar del hígado. La gravedad de estos

efectos por dosis unitaria administrada depende de la especie, el vehículo y el método de administración del cloroformo.

1.8. Bromoformo

En un bioensayo del NTP el bromoformo indujo un pequeño aumento de tumores relativamente poco comunes en el intestino grueso de ratas de ambos sexos, pero no indujo tumores en ratones. Los datos de diversos ensayos de genotoxicidad del bromoformo son ambiguos. El CIIC ha clasificado el bromoformo en el grupo 3 (no clasificable con respecto a su capacidad cancerígena para los seres humanos).

1.9. Dibromoclorometano

En un bioensayo del NTP el DBCM indujo tumores hepáticos en ratones hembra, y posiblemente en los machos, aunque no en ratas. Varios ensayos han estudiado la genotoxicidad del DBCM, pero los datos disponibles no se consideran concluyentes. El CIIC ha clasificado el DBCM en el grupo 3 (no clasificable con respecto a su capacidad cancerígena para los seres humanos).

1.10. Bromodiclorometano

El CIIC ha clasificado el BDCM en el Grupo 2B (posiblemente cancerígeno para el ser humano). Diversos ensayos *in vitro* e *in vivo* de genotoxicidad del BDCM dieron resultados tanto positivos como negativos. En un bioensayo del NTP el BDCM indujo adenomas y adenocarcinomas renales en ratas de ambos sexos y en ratones macho, tumores poco comunes del intestino grueso (pólipos adenomatosos y adenocarcinomas) en ratas de ambos sexos, y adenomas y adenocarcinomas hepatocelulares en ratones hembra. La exposición al BDCM

también se ha relacionado con un posible aumento de los efectos sobre la función reproductora (mayor riesgo de aborto espontáneo o mortinatalidad).

1.11. Valores que intervienen en la formación de THMS

Se ha considerado que la naturaleza y concentración de los derivados potenciales de la desinfección (DBPs) son dependientes de variables como el tipo y concentración del desinfectante utilizado, cantidad de materia orgánica presente en el agua natural, temperatura, fuerza iónica, cantidad de cloro residual, concentración de bromo, tiempo de contacto con el agente desinfectante y el pH.

Según Ochoa, la formación de subproductos se ve favorecida con el aumento de la dosis de cloro y con el aumento del tiempo de contacto agua-cloro, ya que está comprobado que los contenidos de THMS a la salida de las estaciones de tratamiento se incrementan posteriormente en muchos casos, ya en la red, debido principalmente al mayor tiempo de contacto con la materia orgánica que sale de la estación y con sustancias orgánicas que forman biofilmes en la red¹².

1.12. Cloración

El uso del proceso de cloración del agua reduce el riesgo de infección patógena, pero puede representar una amenaza química debido a que se presentan posibles efectos genotóxicos para la salud humana a causa de los residuos de desinfección y sus subproductos¹³. El cloro reacciona con la materia

¹² OCHOA, H. *Desinfectante y nuevas tecnologías utilizadas en el tratamiento del agua potable*. pp. 27-30.

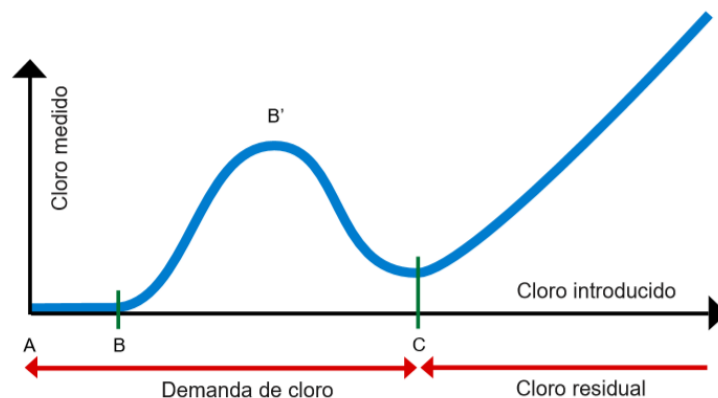
¹³ BERSILLON, J.; DUBEY, S. *Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water*. p. 5.

orgánica en el agua cruda, produciendo una serie de subproductos de hidrocarburos halogenados¹⁴. Al introducir el cloro en el agua, se irán produciendo sucesivamente diversas reacciones químicas. Es conveniente que estos mecanismos se conozcan a la perfección antes de proceder a una operación de desinfección.

1.12.1. Fase AB

El cloro introducido en el agua se combina inmediatamente con la materia orgánica. Consecuentemente, el residual medido se mantiene en cero. Mientras no se destruyan estos compuestos, no se producirá la desinfección.

Figura 1. **Evolución de la cantidad de cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido**



Fuente: OMS. *Cantidad de cloro*. www.proceso%20de%20cloracion. Consulta: marzo de 2020.

¹⁴ KING, W; MARRETT, L. *Case-control study of bladder cancer and chlorination by-products in treated water*. pp. 602-604.

1.12.2. Fase BB: A

A partir del punto B, el cloro se combina con compuestos nitrogenados. Entonces ya se puede medir una cantidad de cloro residual. Esta concentración no corresponde al cloro realmente activo, sino a cloraminas que reaccionan igual que el cloro con los reactivos de los aparatos de medición. Se trata de productos orgánicos complejos, por lo general de fuerte olor y muy poco desinfectantes.

1.12.3. Fase B'C

Cuando se añade más cloro, se observa que la cantidad de cloro residual que se mide con los aparatos ordinarios de medición va en descenso. En realidad, el cloro introducido ha servido para destruir los compuestos formados durante la fase BB. El agua no huele tan mal, pero sigue sin estar desinfectada.

A partir del punto C, el cloro introducido está finalmente disponible para cumplir su función de desinfectante.

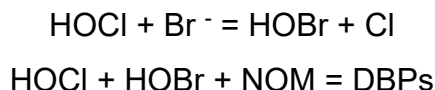
1.13. Materia orgánica natural

La materia orgánica natural (MON) disuelta en el agua se origina por degradación del material vegetal acuática, por arrastre de sustancias orgánicas del suelo y mediante procesos biológicos dentro del agua. La MON comprende un variado abanico de compuestos, la fracción de compuestos más estudiada ha sido la de sustancias húmicas, la cual comprende generalmente del 30 al 50 % del contenido orgánico total en el agua¹⁵.

¹⁵ STEVENS, A; SEEGER, D; GORDON, G; CLOIS, J. *Chlorination of organics in drinking water*. Journal AWWA. pp. 619-620.

1.14. Los iones de bromuro

“La formación de trihalometanos bromados durante la cloración depende de la presencia de bromuros en el agua sin tratar, cuyas fuentes pueden ser la intrusión salina, descargas industriales o derivados de la agricultura”¹⁶. La química de la formación de subproductos bromados incluye primeramente la oxidación del bromuro a ácido hipobromoso (HOBr), por la acción del ácido hipocloroso (HOCl):



Symons, en 1999, estudió la influencia de la concentración de bromuros en la formación de trihalometanos. Determinó que cuando la relación de bromuros a cloruros (moles de Br⁻/ moles de Cl⁺) aumentó de 0,00026 a 0,0465, la relación de trihalometanos bromados (THM-Br) a cloroformo (CHCl₃), aumentó de 0,53 a 2,56.

Galal, en 1994, reportó que las concentraciones pueden variar entre 0,001 a 0,05 mg/l para el bromodiclorometano, 0,001 a 0,02 mg/l para el clorodibrometano, y 0,001 a 0,01 mg/l para el bromoformo. Por su mayor contenido de bromuro natural, las aguas subterráneas cloradas generalmente presentan mayores niveles de trihalometanos bromados que las aguas superficiales cloradas. El aumento de la concentración de bromuros en el agua conlleva un aumento de los subproductos bromados y la disminución de los subproductos clorados. Paralelamente se reduce la concentración de los cinco ácidos acéticos halogenados (HAA5) regulados por la EPA en su reglamento

¹⁶ KRASNER, S. *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. p. 57.

(Stage 1, desinfección DBP Rule)¹⁷. En la tabla IV y figura 2 es posible observar el aumento de los THM's, según la cantidad de materia orgánica total y la concentración de bromuro presente en el agua para consumo.

Tabla IV. **Efecto del TOC y la concentración de bromuros en la formación de THM's**

TOC (mg/L)	TTHM (µg/L). Fuente con 0.01 mg/L de bromuro	TTHM (µg/L). Fuente con 0.8 mg/L de bromuro
1,10	25	88
1,38	32	135
2,00	40	180
3,25	62	240
4,15	75	242

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

p. 96.

¹⁷ XIE, Yuefeng. *Disinfection by products in drinking water, formation, analysis and control*. p. 93.

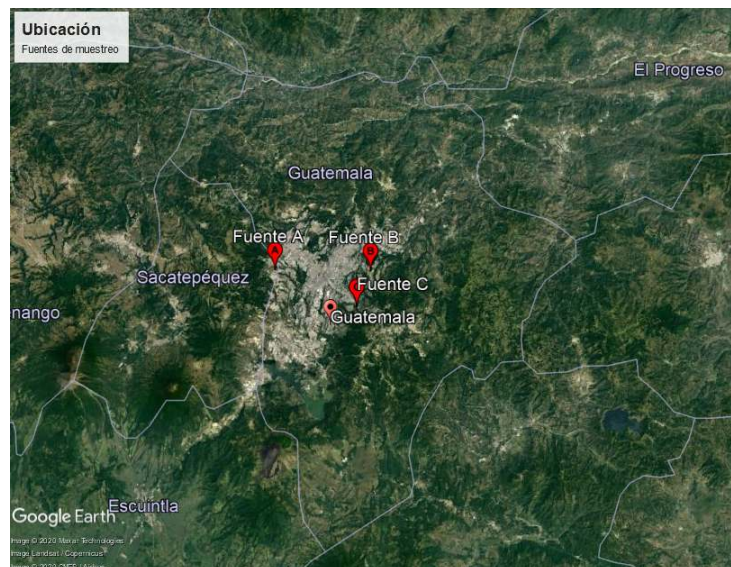
2. METODOLOGÍA

Se extrajeron muestras de tres sitios distintos, tomando de aquí en adelante la denominación de A, B y C 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, los parámetros que se analizaron y el equipo que se requirió.

2.1. Sitio de estudio

Se seleccionaron al azar tres puntos de muestreo de aguas superficiales que han recibido el proceso de potabilización con las siguientes ubicaciones:

Figura 2. Localización de fuentes de muestreo



Fuente: Google Earth. www.earth.google.com. Consulta: marzo de 2020.

2.2. Determinación del número de muestras

El número de muestras se determinó a partir de un análisis estadístico que le brindara validez y representatividad a lo largo del estudio. El método aplicado se describe a continuación.

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.

- Punto de muestreo: dos puntos dentro del departamento de Guatemala y uno en el departamento de Sacatepéquez.
- Diseño del muestreo: toma de muestra en tanques de almacenamiento y puntos específicos dentro de la red de distribución, el espaciamiento temporal por cada muestra será nulo pues se tomarán todas las muestras un mismo día.
- Identificación de la variable dependiente: existencia de trihalometanos (THM).
- Escala de ponderación y comparación (valor normado):

Dentro de la norma: $x \leq 200 \mu\text{g/l}$

Fuera de la norma: $x > 200 \mu\text{g/l}$

- Limitantes: logística y económica en el número total de muestras disponibles $n = 25$
- Cantidad de pruebas por muestreo:

3 puntos con $n = 7$ muestras

3 muestras para blanco

1 muestra de error

Análisis individual por punto ($n = 7$ a 8 muestras).

2.2.2. Ensayo binomial aplicado

Definiciones y consideraciones:

- n : n ensayos o mediciones
- Determinación del acierto o fracaso del estudio.
- Contar la cantidad de éxitos o fracasos obtenidos en n ensayos.

2.2.2.1. Acierto

Encontrar un rango de resultados de n muestras de THM fuera de la norma.

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

Por ser un estudio sin antecedentes previos en la zona, se asume una probabilidad de incidencia de los resultados en 0,5 (verdaderamente aleatorio), sin embargo se hace el análisis para una probabilidad de incidencia de 0,7 con meros fines comparativos y demostrativos a manera de plasmar la variabilidad de los n resultados exitosos que validarían los resultados obtenidos.

Tabla V. **Análisis de 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.

Fuente: elaboración propia.

Entonces:

Ho: $P = 0,5$

Ha: $P > 0,5$

En donde:

Ho: significancia establecida para el experimento

Ha: hipótesis nula

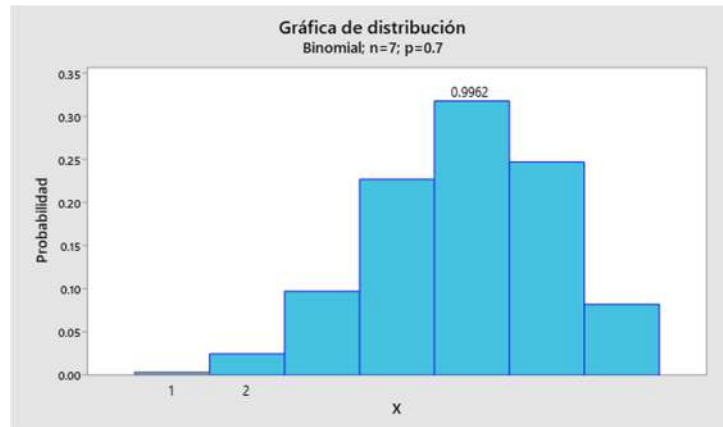
Se justifica que 7 u 8 muestras son suficientes para que con dos hallazgos positivos (valores fuera del rango de la norma) se rechace Ho, evidencia de que se está ante una práctica inapropiada.

Tabla VI. **Definiciones probabilísticas**

Función de densidad de probabilidad	Función de distribución acumulada
Binomial con $n=7$ y $p=7$	Binomial con $n=7$ y $p=7$
$\frac{x P(X = x)}{20.0250047}$	$\frac{x P(X = x)}{10.0037908}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Gráfico de la distribución binomial**



Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Medición de parámetros

Además de la medición de TTHMS se tomaron en cuenta parámetros físicos como la temperatura y químicos como el pH, a continuación se detallan la totalidad de los considerados en la investigación:

2.2.3.1. Parámetros de medición

- Thihalometanos totales TTHMS
- Potencial de hidrógeno
- Temperatura
- Conductividad eléctrica
- Sólidos disueltos
- Cloro residual

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

2.2.3.2. Toma de muestras

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

2.2.4. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini de Molina, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, siguiendo el procedimiento planteado del método HATCH 10132: calentamiento indirecto, para la determinación de pruebas de potencial formación de THM en muestras de agua potable (febrero de 2020).

2.2.4.1. Material y equipo

Tabla VII. **Materiales y equipo de laboratorio**

Materiales	Equipo
Tubo de ensayo con tapón de rosca	Espectrofotómetro DR Hach 1900, programa 725, THM Plus, medido en CHCl_3 (ppb)
Celdas con capacidad de 50 cm ³ con rosca	Potenciómetro
Pipetas volumétricas de diferentes capacidades: (1cm ³ , 5 cm ³ , 10 cm ³)	Conductívimetro
Termómetro	Kit para prueba de cloro libre y residual
Succionador de pipeta	Campana de absorción
Gradillas	Estufa

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Equipo de laboratorio**



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

Figura 5. Preparación de muestras



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

Figura 6. Muestras para lectura y blanco



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

2.2.5. Reactivos utilizados para la medición

- 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).

2.3. Normas de calidad del agua y valores normados de THMS

Las normas internacionales para el agua potable de la OMS de 1958, 1963 y 1971 no hicieron referencia a los trihalometanos. 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 distintos del cloroformo, tras una evaluación pormenorizada de los compuestos. Se estableció un valor de referencia basado en efectos sobre la salud de 0,03 mg/l únicamente para el cloroformo, ya que se disponía de pocos datos sobre los demás trihalometanos 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 indicó que el valor de referencia para el cloroformo se obtuvo mediante una extrapolación lineal multietapa de los datos obtenidos en ratas macho, un modelo matemático cuya incertidumbre es considerable.

Se mencionó asimismo que, aunque los datos toxicológicos disponibles resultaban útiles únicamente para establecer un valor de referencia para el cloroformo, también debían reducirse al mínimo las concentraciones de los demás trihalometanos. En varios países se han establecido límites para la suma de las concentraciones de bromoformo, DBCM, BDCM y cloroformo que oscilan

entre 0,025 y 0,25 mg/l, lo que representa un equilibrio entre las concentraciones que se pueden alcanzar en determinadas circunstancias y las concentraciones deseables. La segunda edición de las guías, publicada en 1993, no estableció ningún valor de referencia para el total de los trihalometanos, aunque sí estableció valores de referencia para cada uno de los cuatro por separado.

Tabla VIII. **Criterios de calidad de agua normados para consumo humano**

Parámetros de calidad del agua para consumo

Parámetro	U	OMS		US EPA		UE		CAPRE	
		LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP	LMA	LMP
pH	U	6,5	8,5	6,5	8,5	-	7	6,5	8,5
Temperatura	°C	18	30	18	28	18	24	18	30
Sólidos disueltos	mg/L	500	1000	500	1000	500	1500	500	1000
Conductividad	µs/cm	-	1500	-	1000	-	2500	-	400
Cloro residual	mg/L	0,5	1	-	0,5	0,5	1	0,5	1
Cloroformo (CHCl ₃)	µg/L	-	300	-	-	-	80	-	200
Trihalometanos totales	µg/L	-	-	-	80	-	-	-	-

Fuente: WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality*, p. 427. EPA. *National Primary Drinking Water Regulations*, p. 6. y CAPRE. *Normas de Calidad de Agua para Consumo Humano*, p. 17.

Las autoridades que deseen establecer una norma para el total de trihalometanos que tenga en cuenta la toxicidad aditiva pueden usar un método de fraccionamiento en el que la suma de los cocientes entre cada uno de los cuatro trihalometanos y sus respectivos valores de referencia sea menor o igual a 1. Las guías de 1993 establecieron valores de referencia basados en efectos sobre la salud de 0,1 mg/l para el bromoformo y el DBCM, y se calcularon valores de referencia de 0,06 mg/l para el BDCM y de 0,2 mg/l para el cloroformo, asociados a un valor máximo del riesgo adicional vitalicio de cáncer de 10⁻⁵.

El valor de referencia de 0,2 mg/l del cloroformo se mantuvo en el apéndice a la segunda edición de las guías, publicado en 1998, pero se calculó a partir de una IDT para efectos con umbral. Estos valores de referencia se incluyeron en la tercera edición.

A pesar que ha sido normado las concentraciones máximas individuales de THMS en el agua, ninguna de las mencionadas anteriormente define un límite máximo para la cantidad de TTHMS, las guías de la OMS proponen una ecuación para definir un límite con base en los criterios locales en contraste con los establecidos por la misma OMS, sin embargo las normas de calidad de agua para consumo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) sí definen un criterio para la concentración máxima de TTHMS, por lo que han sido seleccionadas para la aplicación en el presente estudio.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan de forma individual los resultados de laboratorio que se obtuvieron de cada uno de los puntos de muestreo, seguidos de una representación gráfica del comportamiento y resultados promedio para cada una de las variables que intervinieron durante el estudio. Por último se presentan los resultados globales de toda la fase experimental y que describen los principales hallazgos en esta investigación.

3.1. Fuentes A, B y C

Los resultados obtenidos del análisis de los afluentes son:

Tabla IX. **Resultados de laboratorio: fuente A**

Ensayo	Cloro Residual	pH (Unid)	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	S.D. (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	TTHMS
1	0,3	6,50	330,00	165,00	20	134
2	0,3	6,52	321,34	160,67	20	112
3	0,3	6,55	325,78	162,89	20	135
4	0,3	6,00	331,96	165,98	20	138
5	0,4	6,20	334,71	167,355	20	129
6	0,4	6,21	316,38	158,19	21	107
7	0,3	6,20	337,25	168,625	21	119
Promedio	0,3	6,31	328,20	164,10	20	125
Desviación estándar	0,1	0,21	7,46	3,73	0,39	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados de laboratorio: fuente B**

Ensayo	Cloro Residual	pH (Unid)	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	S.D. (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	TTHMS
1	0,5	6,40	350,68	175,34	20	121
2	0,5	6,45	280,92	140,46	19	136
3	0,5	6,31	321,45	160,725	19	124
4	0,5	6,40	335,31	167,655	20	130
5	0,5	6,40	296,87	148,435	20	132
6	0,5	6,39	356,21	178,105	21	127
7	0,5	6,43	343,69	171,845	20	120
Promedio	0,5	6,40	326,45	163,22	20	127
Desviación estándar	0,0	0,04	28,35	14,17	1	6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de laboratorio: fuente C**

Ensayo	Cloro Residual	pH (Unid)	C.E. ($\mu\text{S/cm}$)	S.D. (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	TTHMS
1	0,2	6,11	143,89	71,94	20	19
2	0,2	6,23	137,54	68,77	20	5
3	0,2	6,23	140,84	70,42	20	17
4	0,2	6,20	141,52	70,76	20	13
5	0,2	6,20	140,65	70,32	20	9
6	0,2	6,21	142,52	71,26	20	15
7	0,2	6,20	140,00	70,00	20	0
Promedio	0,2	6,20	140,99	70,50	20	11
Desviación estándar	0,0	0,04	2,00	1,00	0	7

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultados globales

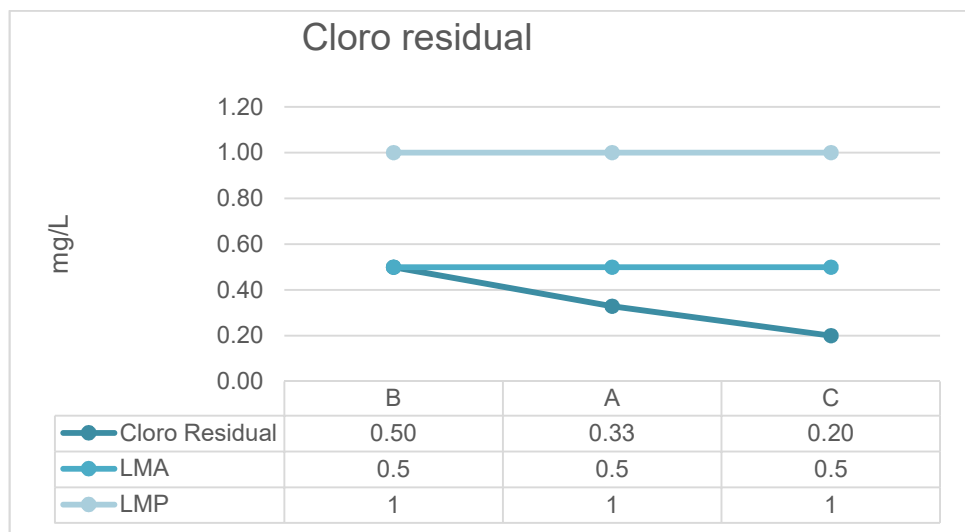
Los resultados globales son:

Tabla XII. **Resultados de laboratorio promedio**

Ensayo	A	B	C
Cloro Residual	0,33	0,50	0,20
pH (Unid)	6,31	6,40	6,20
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	328	326	141
S.D. (mg/L)	164	163	71
T ($^{\circ}\text{C}$)	20,21	20,07	20,00
TTHMS ($\mu\text{g}/\text{L}$)	125	127	11

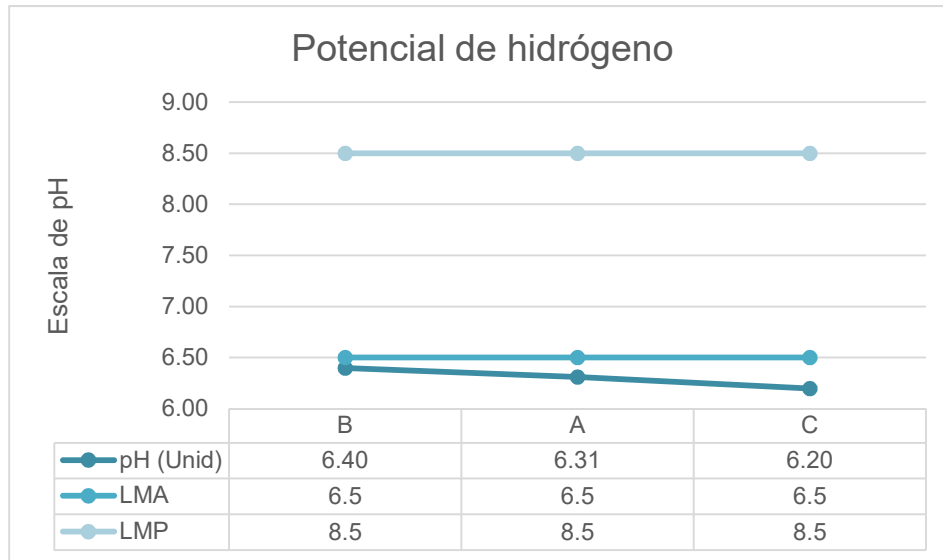
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Cloro residual**



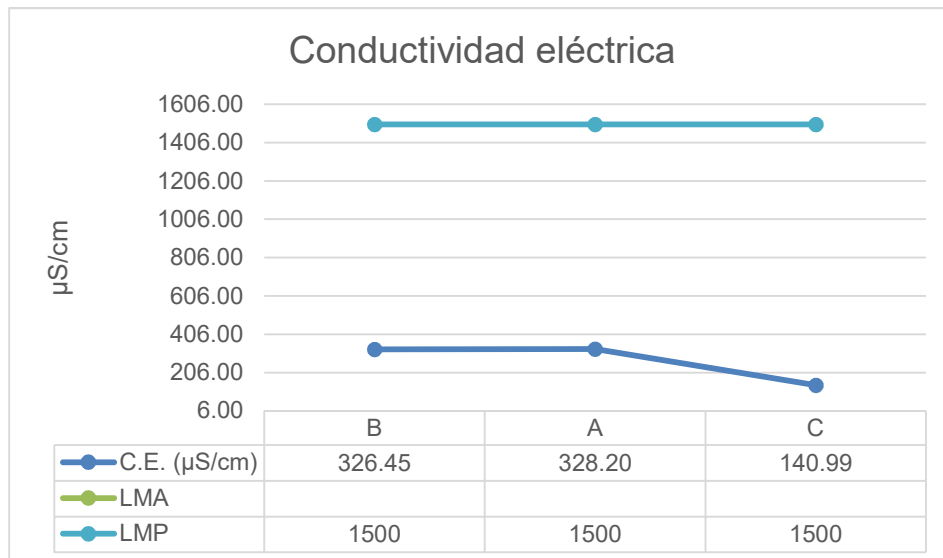
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Potencial de hidrógeno**



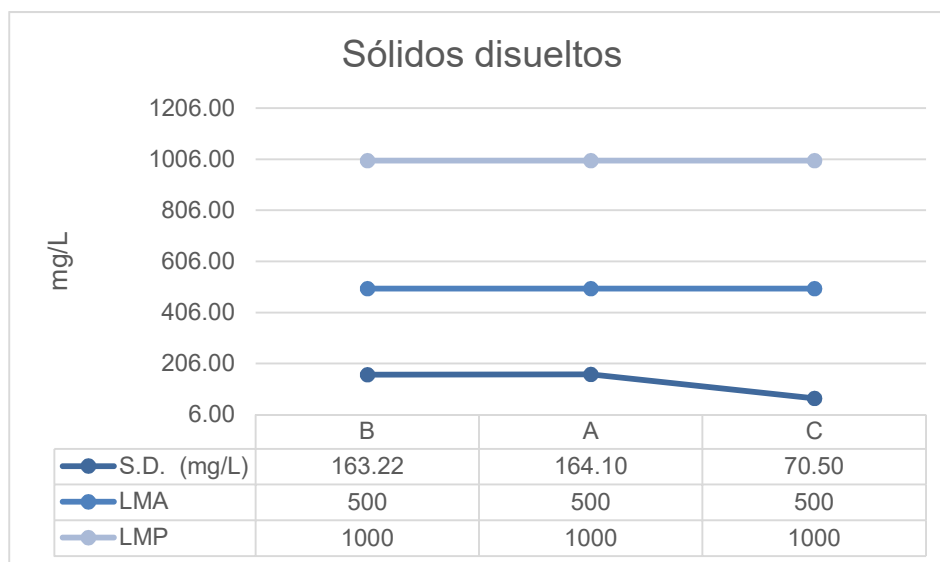
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Conductividad eléctrica**



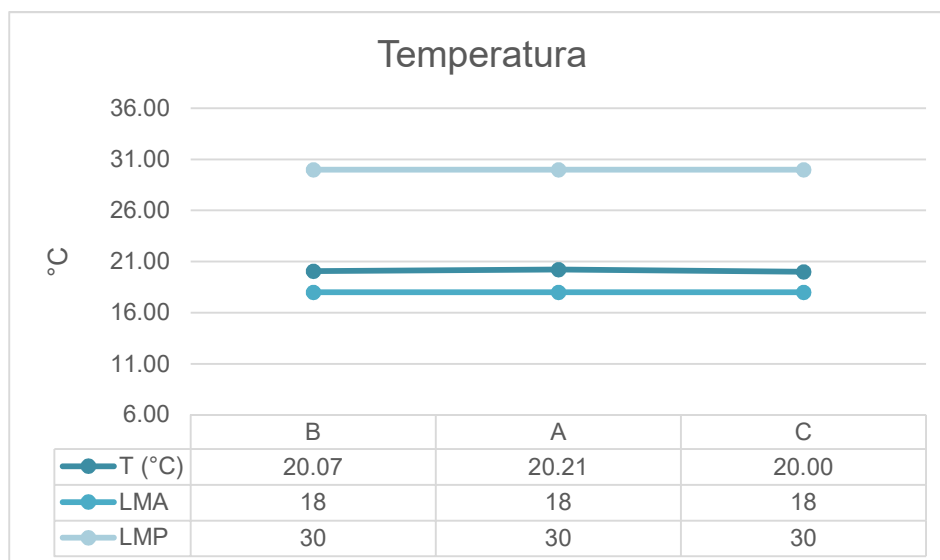
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Sólidos disueltos**



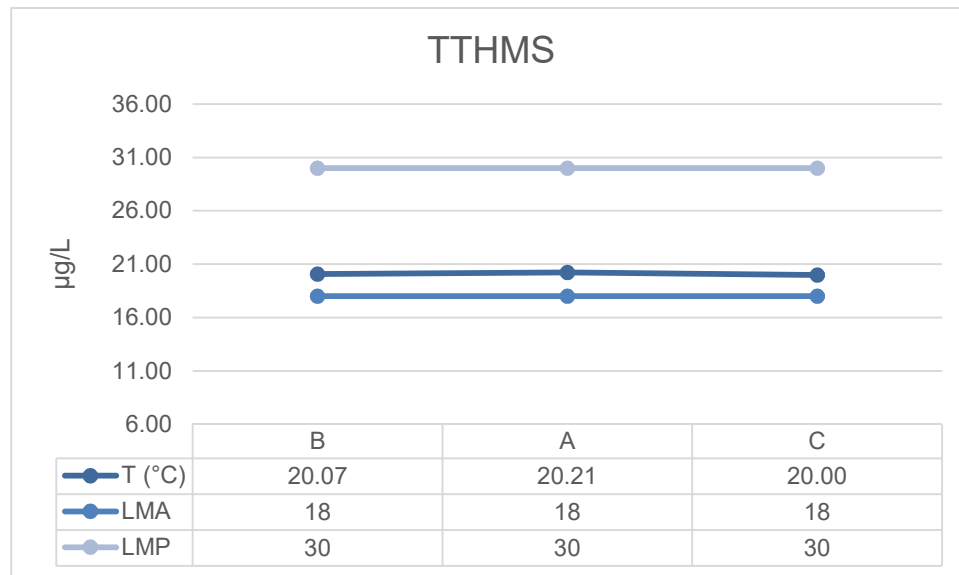
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Temperatura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **TTHMS**

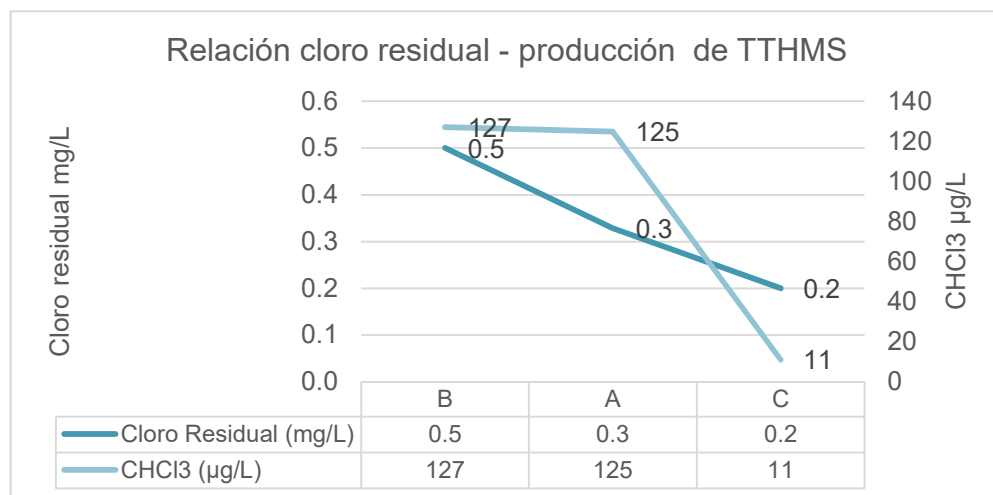


Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

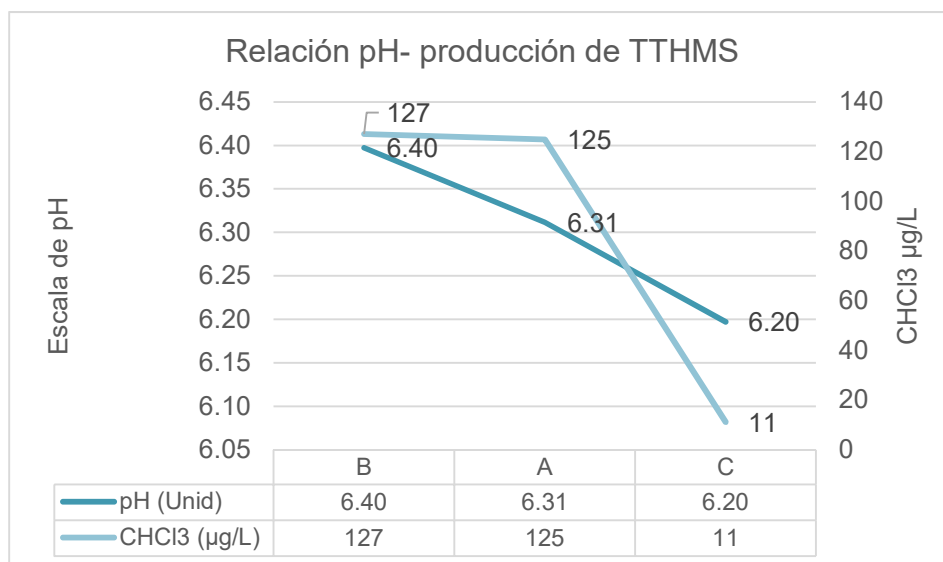
Los resultados fueron comparados con los valores frontera establecidos en las normas y regulaciones de agua para consumo humano de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA). Cabe aclarar que actualmente Guatemala cuenta con la norma COGUANOR NTG 29001: agua para consumo humano (agua potable). Entre las especificaciones debe tomarse en cuenta que no contempla los subproductos de la desinfección y que la norma COGUANOR NTG 29005: agua envasada para consumo humano, por su naturaleza limita la aplicabilidad de sus criterios para los alcances que se pretenden abarcar en el estudio. A continuación se presenta un grupo de gráficos que remarcan la incidencia de los parámetros estudiados con la formación de TTHMS.

Figura 13. **Relación cloro residual – producción de TTHMS**



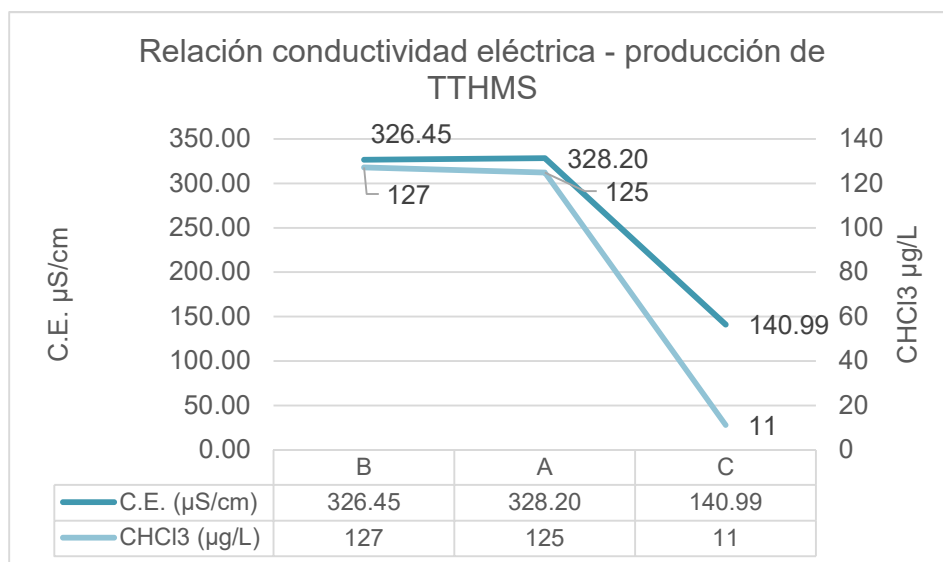
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Relación nivel de pH – producción de TTHMS**



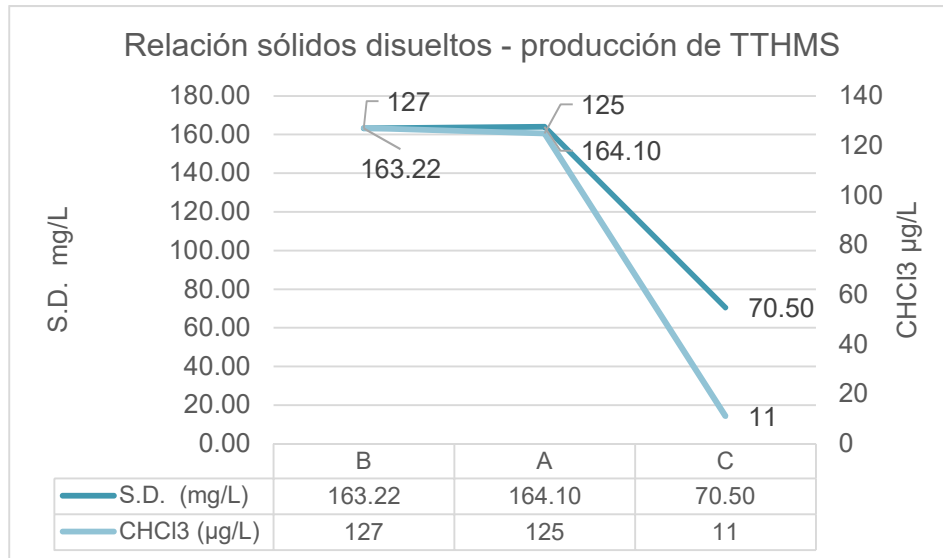
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Relación conductividad eléctrica – producción de TTHMS**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Relación sólidos disueltos – producción de TTHMS**



Fuente: elaboración propia.

Las muestras fueron obtenidas después de pasar un proceso de tratamiento de agua para consumo humano y acorde a los resultados obtenidos, dos fuentes de todas las analizadas sobrepasan los límites establecidos para la calidad del agua de consumo humano propuestas, lo que demuestra que existen problemas de generación de subproductos de la desinfección en el proceso de potabilización que llevan a cabo. De todos los parámetros considerados se puede apreciar en la figura 10 que el potencial de hidrógeno se encuentra fuera de norma, sin embargo la diferencia no resulta tan abrupta como para creer que se pueda tener un problema de acidez.

Los niveles de cloro residual están plasmados en la figura 9 y puede observarse que no están dentro de los valores frontera, sin embargo tal hecho no es tan contraproducente en el análisis de esta investigación si se toma en cuenta que algunas de las muestras fueron tomadas en puntos dentro de la red de

distribución y que, por la misma naturaleza del agua entubada, el movimiento que atraviesa el fluido dentro de todo su recorrido de conducción hasta su consumo afecta directamente al cloro residual libre por aspectos como la suciedad en la tubería, infiltraciones, entre otros.

Otro punto importante a resaltar puede observarse en la figura 15, la cual muestra una relación directa entre la concentración del cloro residual y la formación de TTHMS. Las muestras examinadas de la fuente B tuvieron una mayor concentración de cloro residual y en los análisis de laboratorio se obtuvieron también las concentraciones más altas de formación de TTHMS. Sabiendo que la formación de subproductos de la desinfección con respecto a la cantidad de cloro suministrada para la desinfección del agua depende de factores como la materia orgánica total (carbono orgánico disuelto), dosis y tiempo de contacto. La fuente C, por el contrario, obtuvo la menor concentración de cloro residual y menor concentración de formación de TTHMS.

La figura 34 muestra una relación directa entre la formación de TTHMS y el nivel del potencial de hidrógeno, tal como indica la teoría, la tasa de formación de subproductos de la desinfección se ve directamente ligada al nivel de pH y en este caso se puede afirmar que la formación de cloroformo se incrementa a mayores valores de pH.

Los niveles de formación de TTHMS representan riesgos potencialmente significativos, sin embargo no existen antecedentes ni indicios para pensar que el agua de consumo puede estar contribuyendo a la formación de compuestos cancerígenos y que ello signifique daños directos en la salud de la población que está siendo abastecida de las fuentes de estudio, sin embargo, es recomendable tomar acciones dentro del proceso de potabilización que permitan la reducción y cumplimiento de estándares de calidad, de esta manera se reduce la posibilidad

de afecciones en la población debido al consumo de agua con presencia de TTHMS.

Se han tocado los precursores más importantes en la formación de subproductos de la desinfección, sin embargo también es importante aclarar que las condiciones del sistema de conducción y distribución del agua potable afectan directamente en la formación de TTHMS, por lo que se vuelve necesario tener un monitoreo constante de la formación de TTHMS en distintos puntos dentro de la red de distribución y no únicamente en tanques de distribución.

CONCLUSIONES

1. Se comprobó parcialmente la validez de la hipótesis al obtener concentraciones de TTHMS de 125 µg/L y 127 µg/L en las fuentes A y B, respectivamente, que se encuentran por encima del valor frontera establecido en las normas y regulaciones de la calidad de agua para consumo humano propuestas por la USEPA (80,00 µg/L), por otro lado la fuente C con una concentración de 11 µg/L se encuentra dentro de la norma, por lo cual no aplica el criterio de la hipótesis planteada.
2. Se comprobó que el cloro residual, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura guardan una relación directa que impacta en la generación de trihalometanos, siendo mayor la producción a medida que mayor sean dichos parámetros.
3. Se demostró que se están generando TTHMS en el proceso de potabilización del agua proveniente de fuentes superficiales, y que dos de los puntos examinados no cumplen la normativa de calidad del agua potable de la USEPA, por lo que existe la posibilidad de que la formación de TTHMS esté afectando negativamente la salud de las personas que consumen agua proveniente de las fuentes analizadas.
4. La manera más efectiva de reducción de TTHMS en el ciclo de tratamiento de agua para consumo humano es la inclusión de una etapa de filtración con carbón activado posterior a la desinfección.

5. Por su volatilidad la ebullición representa la manera más efectiva para reducir la concentración de TTHMS en agua potable, por lo que representa una solución inmediata para tratar el agua en los hogares en donde se presenten altas tasas de generación.

RECOMENDACIONES

1. Depurar los precursores orgánicos aplicando procesos de pretratamiento como la preoxidación, tratamiento biológico y filtración lenta con arena. De esta forma se incrementará la eficiencia del cloro residual y paralelamente se minimiza la toxicidad al limitar esa formación de trihalometanos o cualquier otro subproducto.
2. Atender más temas relacionados con la generación de subproductos de la desinfección y su monitorización, manejo, depuración y efectos sobre el ser humano producto de su consumo, aplicado en Guatemala, y así seguir trabajando para demostrar si efectivamente existe o no una relación directa con el desarrollo de cáncer.
3. Sensibilizar a las autoridades encargadas del suministro de agua potable la monitorización y acciones relacionadas con la calidad del agua, puntualmente la generación de subproductos de la desinfección, como principio de desarrollo de nuevos hábitos sanitarios que ayuden a mejorar la calidad del agua de consumo humano.
4. Como uno de los principales fines de la investigación, se recomienda que la información aquí plasmada sirva para entablar comunicación con las instituciones que brindan servicios de potabilización de agua, lo que ayude al desarrollo científico y técnico de estas, y a la formación y desarrollo de investigaciones en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

5. Es útil la implementación de la filtración casera del agua potable como un recurso para reducir hasta en un 50 % la concentración de TTHMS en agua potable con concentraciones fuera de norma que no superen los 120 ppb. En los casos donde se supera tal brecha se recomienda hervir el agua aprovechando el comportamiento volátil de tales compuestos y lograr reducir más del 90 %.

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. Agencia de Salud Pública de Barcelona. *Los trihalometanos (THM) en el agua de consumo. Documento informativo*. Barcelona. CSB, 2016. 2 p.
3. BATTERMAN, Stuart; HUANG, An-Tzu; WANG, Shugin; ZHANG, Lian. *Reduction of ingestion exposure to trihalomethanes due to volatilization*. Michigan. Environment, Science and Technology. 2000. pp. 4418-4424.
4. CALDERÓN, J.; CAPELL, C.; CENTRICH, F.; ARTAZCO, L.; GONZÁLES, M.; VILLALBÍ, J. *Subproductos halogenados de la cloración en el agua de consumo público*. Barcelona. Gac Sanit. 2002. pp. 241-243.
5. CHAMORRO BOLAÑOS, Ximena; ROSERO, Milton; ENRÍQUEZ, Alba Lucy. *Materia orgánica y trihalometanos en agua para consumo humano: seguimiento a precursores orgánicos y trihalometanos en agua de la planta Centenario de la ciudad de Pasto*. Madrid. Editorial Académica Española. 2012. 144 p.

6. Comisión Guatemalteca de Normas. *Agua para consumo humano (agua potable). Especificaciones*. Guatemala. COGUANOR. 2013. 12 p.
7. Comisión Guatemalteca de Normas. *Agua Potable. Especificaciones*. Guatemala. COGUANOR. 1985. 15 p.
8. Dirección de Información Geográfica. *Estratégica y Gestión de Riesgos. Importancia de los ríos Xayá y Pixcayá para abastecer de agua potable a la ciudad de Guatemala*. Guatemala. MAGA. 2016. 27 p.
9. GELOVER, Silvana; BANDALA, Erick; LEAL-ASENSIO, Teresa; PÉREZ, Sixto; MARTÍNEZ, Evaristo. *GC-MS Determination of volatile organic compounds in drinking water supplies in Mexico*. Morelos. Environmental Toxicology. 2000. pp. 131-139.
10. Hach Company. *Trihalometanes: THM Plus Metod 10132*. Colorado. HACH, 2017. 8 p.
11. HERNÁNDEZ, Cintia; GONZÁLES, Luis; RUBIO, Carmen; CABALLERO, José; NAOUAL, El-Mousati; HARDISSON, Arturo. *Trihalometanos en aguas de consumo humano*. Pamplona. Asociación Española de Toxicología, 2011. pp. 109-114.
12. HERNÁNDEZ, M.; MARRUGO, J. *Trihalometanos y arsénico en el agua de consumo en los municipios de Chinú y Corozal de Colombia: evaluación del riesgo a la salud*. Chinú. Ingeniería y Desarrollo. 2016 pp. 110-112.

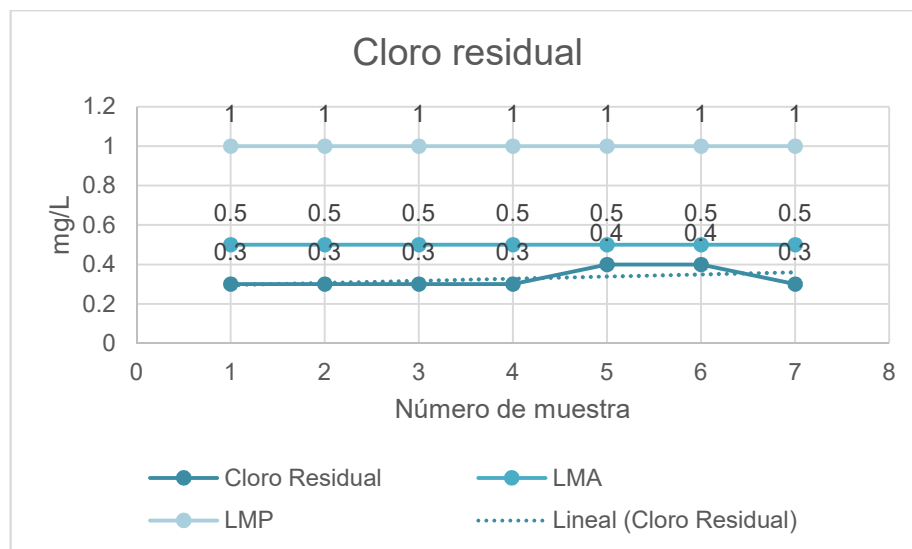
13. IBARZUELA, Jesús; GOÑI, F.; SANTAMARÍA, J. *Trihalometanes in water supplies in the San Sebastian Area, Spain*. San Sebastián. Environmental Contamination and Toxicology. 1994. pp. 411-418.
14. MENDOZA SALTOS, MARÍA DOLORES; VERA MUÑOZ, SANDRA MARIEL. *Formación de trihalometanos y la manera más factible de su eliminación en el sistema de agua potable: Ing. Luis Alberto Gómez Ortiz “El ceibal” (EPAM). En el sitio “El pueblito” del cantón Rocafuerte en el período: enero 2010 hasta julio 2010*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo. 2010. 102 p.
15. OLMEDO SÁNCHEZ, María Teresa. *Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos del cloro. Efectos sobre la salud*. Granada. Higiene y Sanidad Ambiental, 2008. pp. 335-342.
16. Organización Mundial de la Salud. *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra. OMS, 2006. pp. 183-189.
17. PAZ STUBBS, Víctor Manuel. *Fuentes de abastecimiento de agua en el Municipio de Guatemala: fuentes superficiales*. Guatemala. EMPAGUA. 2017. 10 p.
18. RAM, Neil; CHRISTMAN, R.; CANTOR, Kenneth. *Significance and treatment of volatile organic compounds in water supplies*. Chelsea. Lewis Publishers. 1990. 558 p.

19. REILLY, Alan. *Documento de debate sobre la utilización de agua clorada*. Noruega. FAO/OMS. 2000. 17 p.
20. RODRÍGUEZ, Manuel; RODRÍGUEZ, German; SERODES, Jean; SADIQ, Rehan. *Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación*. Caracas. Asociación Interciencia, 2007. pp. 749-756.
21. SÁNCHEZ, Alicia. *Efectos de los trihalometanos en la salud*. Granada. Higiene y Sanidad Ambiental. 2008. pp. 280-290.
22. SARMIENTO, Alvez; MEDINA, Elisa; CASANOVA, J.; OLIVER, C. *Investigación de trihalometanos en agua potable del Estado Carabobo, Venezuela*. Valencia. Gac Sanit. 2002. pp. 137-143.
23. TABARINI, Alba. *Calidad del agua de las fuentes superficiales y subterráneas, plantas de tratamiento y pozos de influencia que abastecen la red de distribución de la ciudad de Guatemala*. Guatemala. Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria del Centro de Investigaciones de Ingeniería. 2004. 79 p.
24. TAPIA, A.; REYES, A.; GARCÍA, I. *Estudio de la fracción de materia orgánica de mayor remoción en el proceso de coagulación-floculación usando agua superficial*. Managua. Nexa Revista Científica. 2011. pp. 78-80.
25. United States Environmental Protection Agency. *National primary drinking water regulation*. Washington D.C. USEPA. 2009. 7 p.

26. VILLANUEVA, Cristina; MANOLIS, Kogevinas; JOAN, Grimalt. *Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga*. Barcelona. Gaceta Sanitaria. 2001. pp. 48-53.
27. WEINBERG, Howard; KRASNER, Stuart; RICHARDSON, Susan; THRUSTON, Alfred. *The occurrence of disinfection by-products (DBPs) of health concern in drinking water: result of a nationwide DBP occurrence study*. Washington D.C. U.S. Environmental Protection Agency. 2002. p. 320.
28. World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality*. Ginebra. WHO. 2017. 541 p.

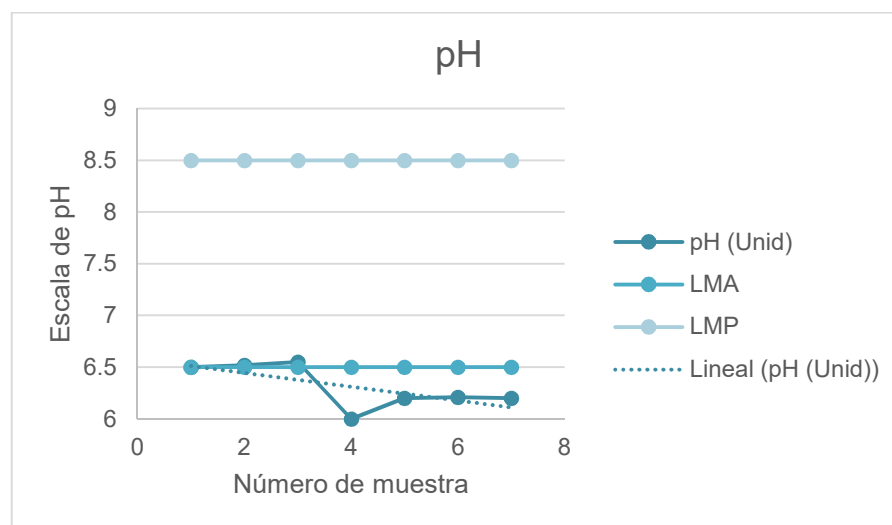
APÉNDICE

Apéndice 1. Comportamiento del cloro residual. Fuente A



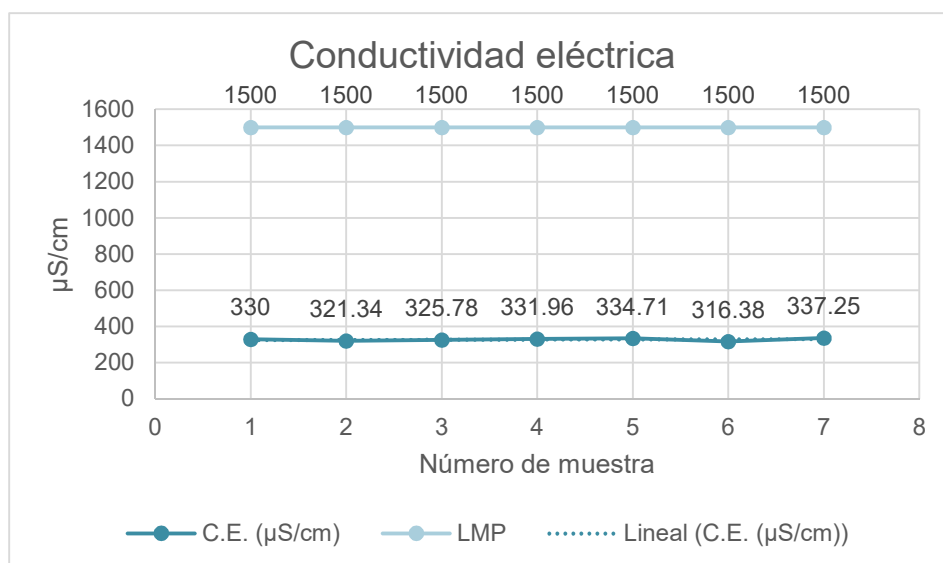
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Comportamiento del pH. Fuente A



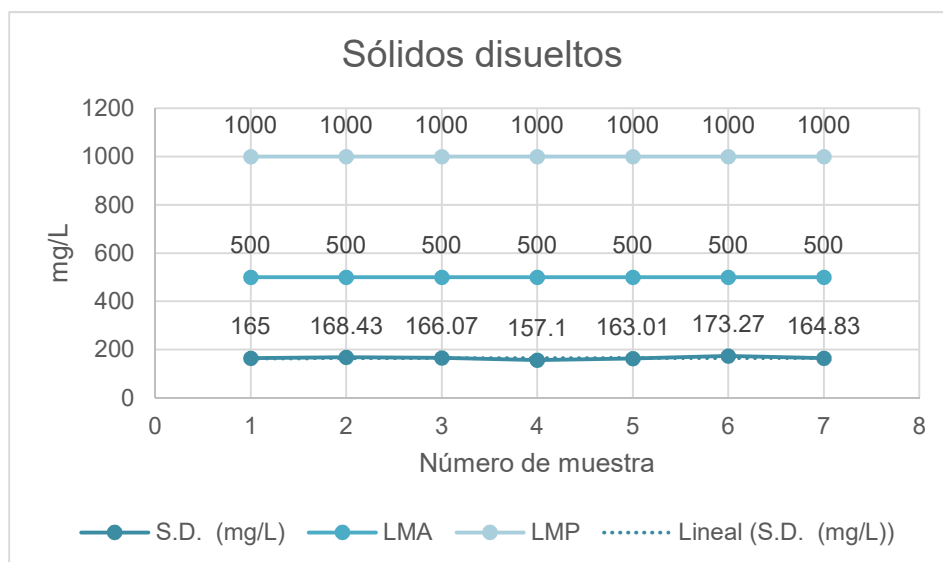
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Comportamiento de la conductividad eléctrica. Fuente A



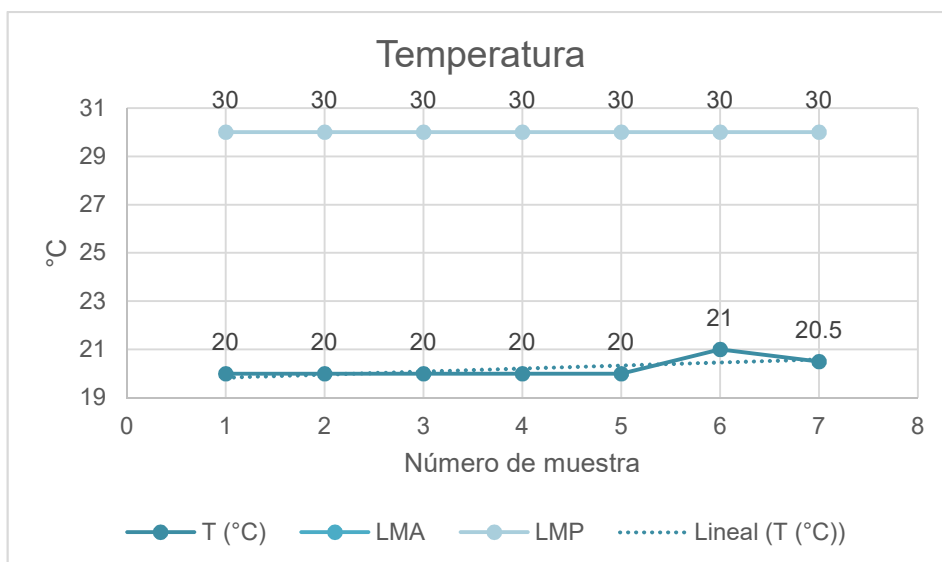
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Comportamiento de los sólidos disueltos. Fuente A



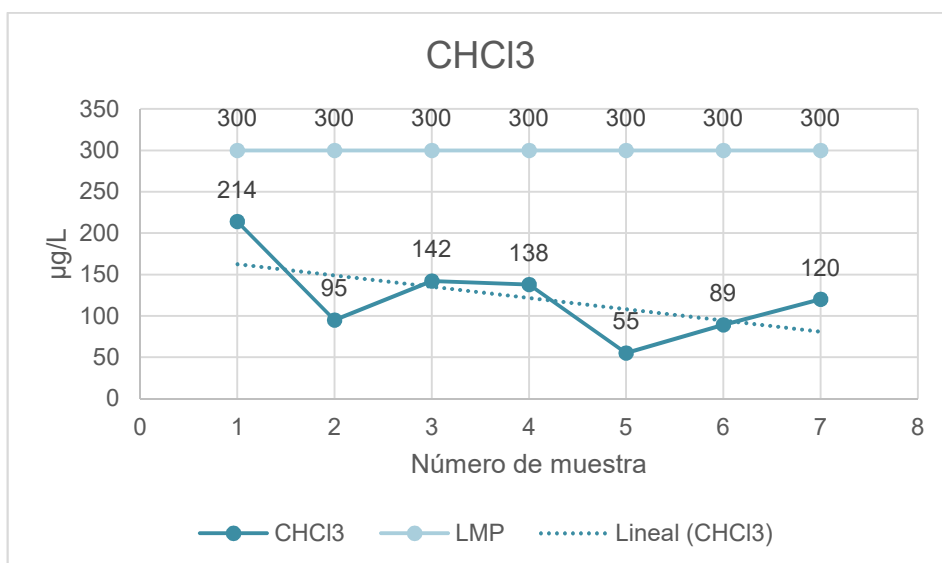
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Comportamiento de la temperatura. Fuente A



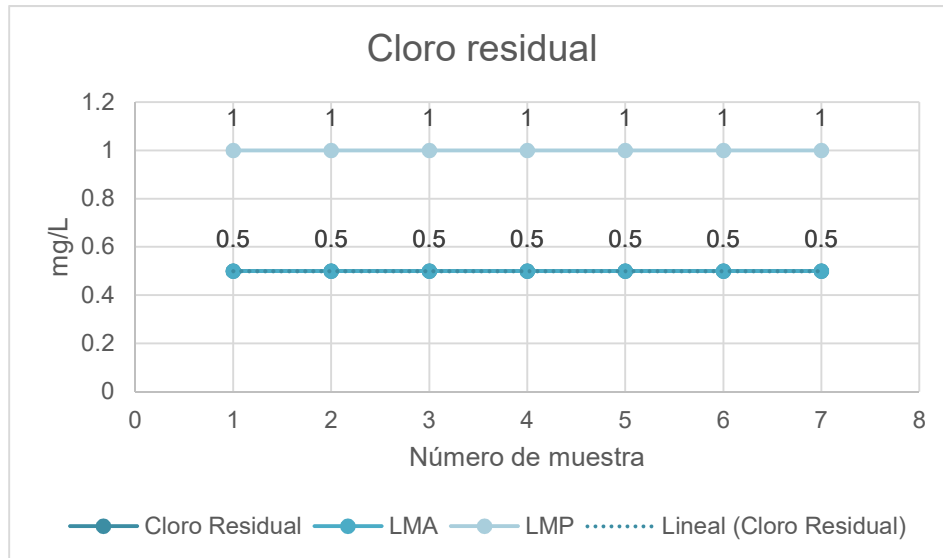
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Comportamiento de CHCl_3 . Fuente A

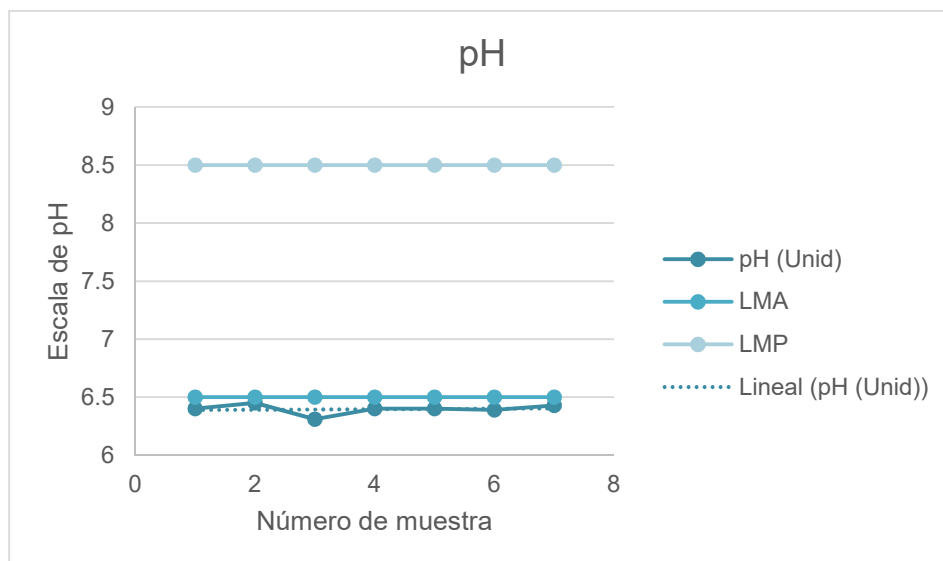


Fuente: elaboración propia.

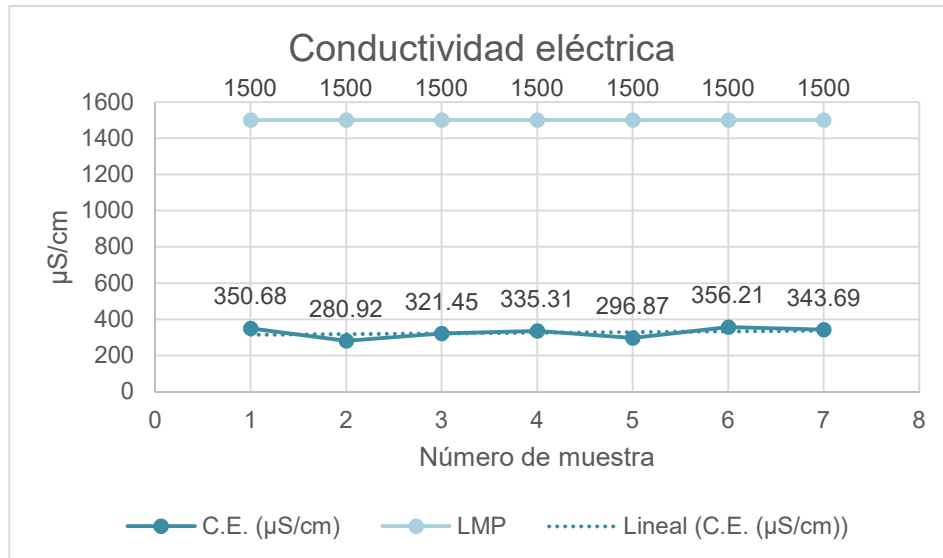
Apéndice 7. Comportamiento del cloro residual. Fuente B



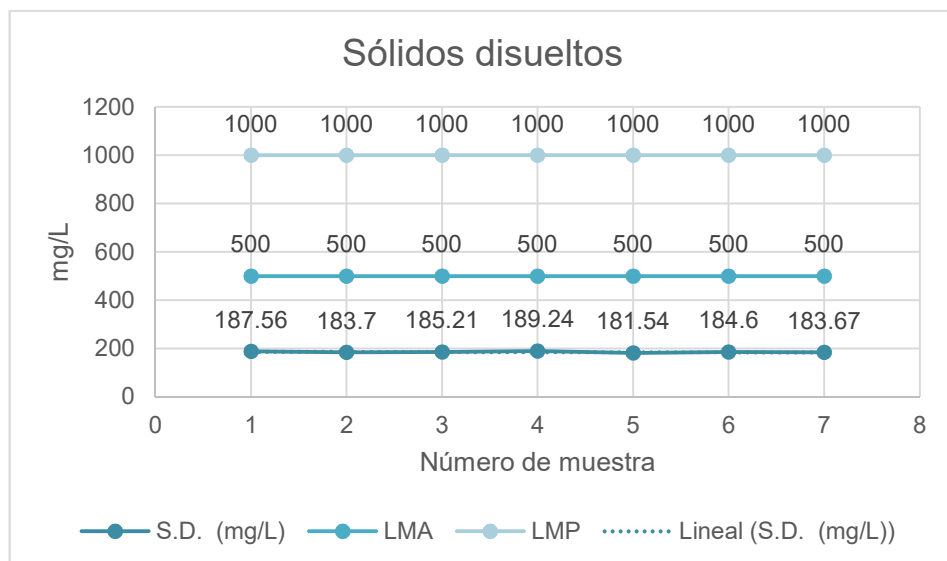
Apéndice 8. Comportamiento del pH. Fuente B



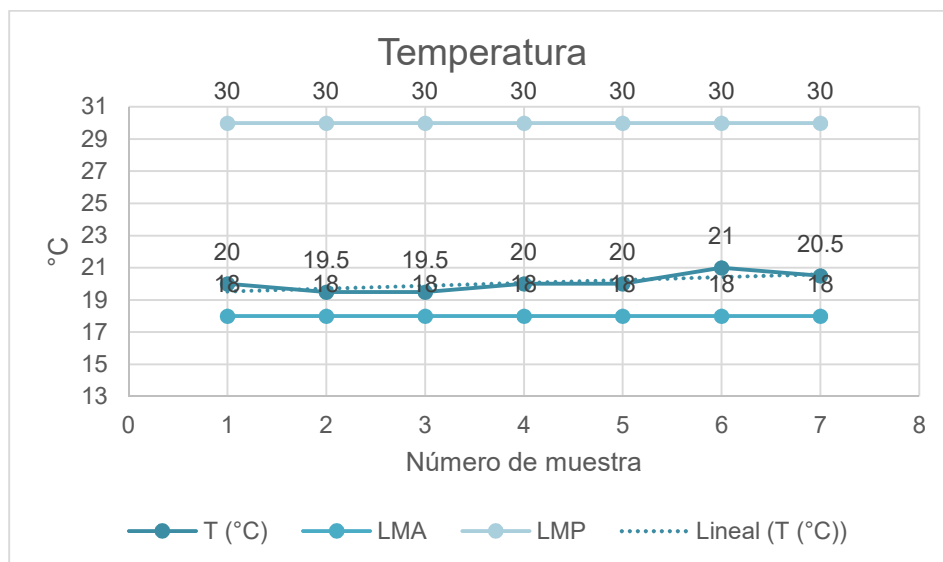
Apéndice 9. Comportamiento de la conductividad eléctrica. Fuente B



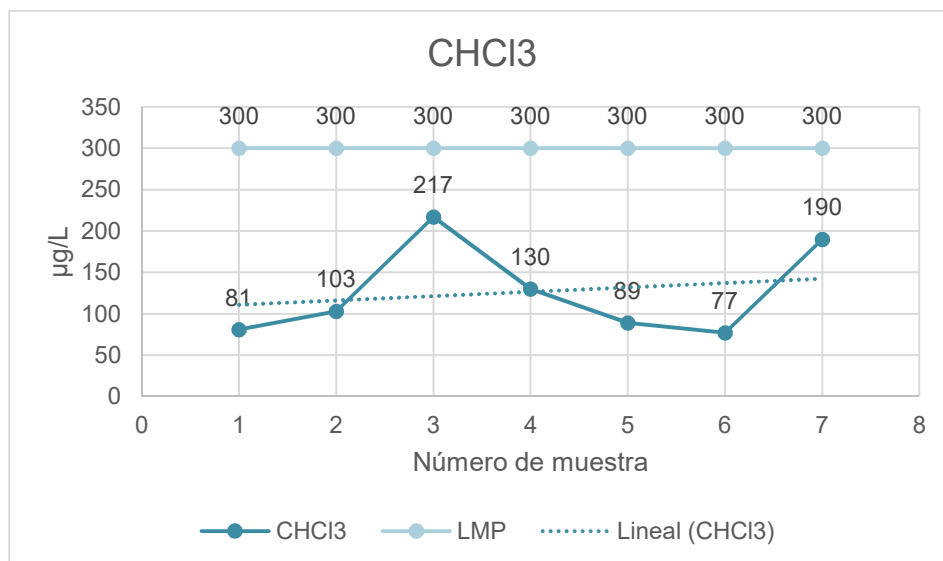
Apéndice 10. Comportamiento de los sólidos disueltos. Fuente B



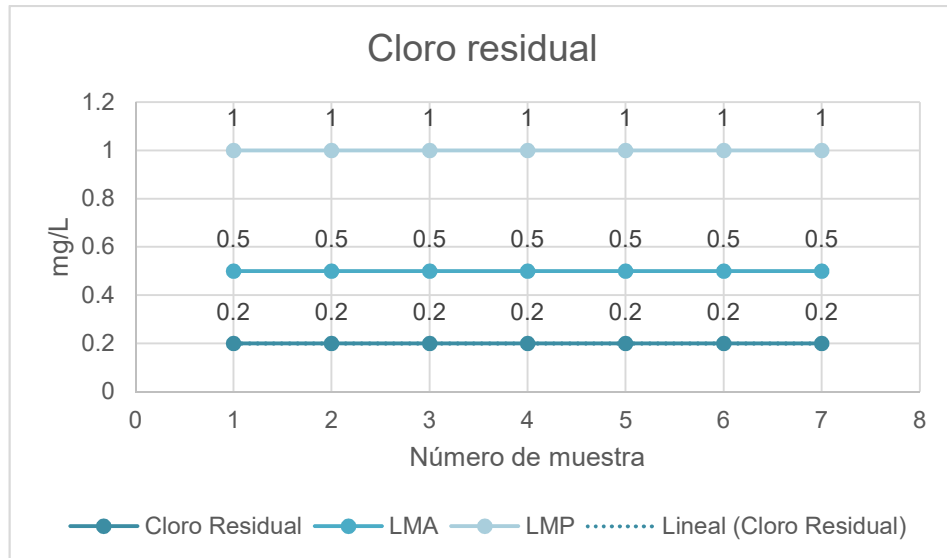
Apéndice 11. Comportamiento de la temperatura. Fuente B



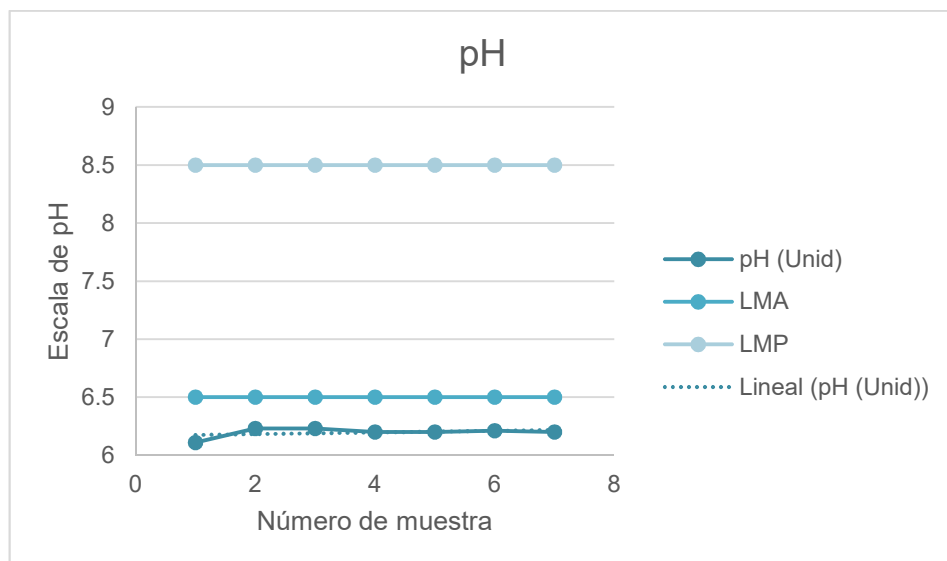
Apéndice 12. Comportamiento de CHCl₃. Fuente B



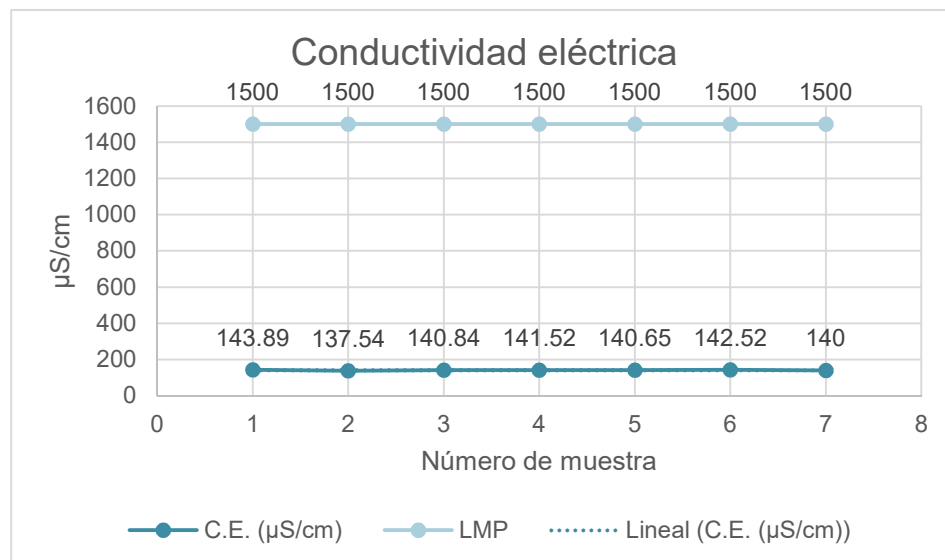
Apéndice 13. Comportamiento del cloro residual. Fuente C



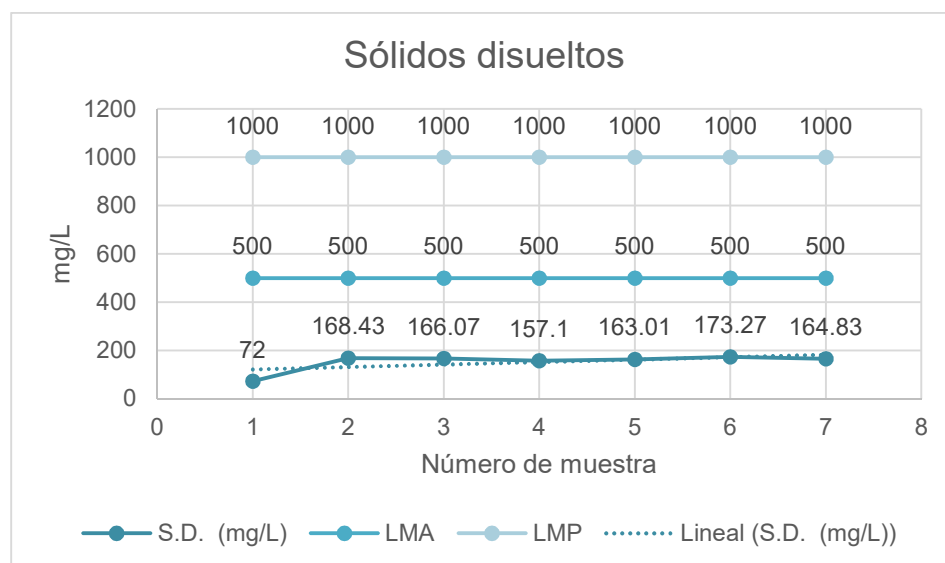
Apéndice 14. Comportamiento del pH. Fuente C.



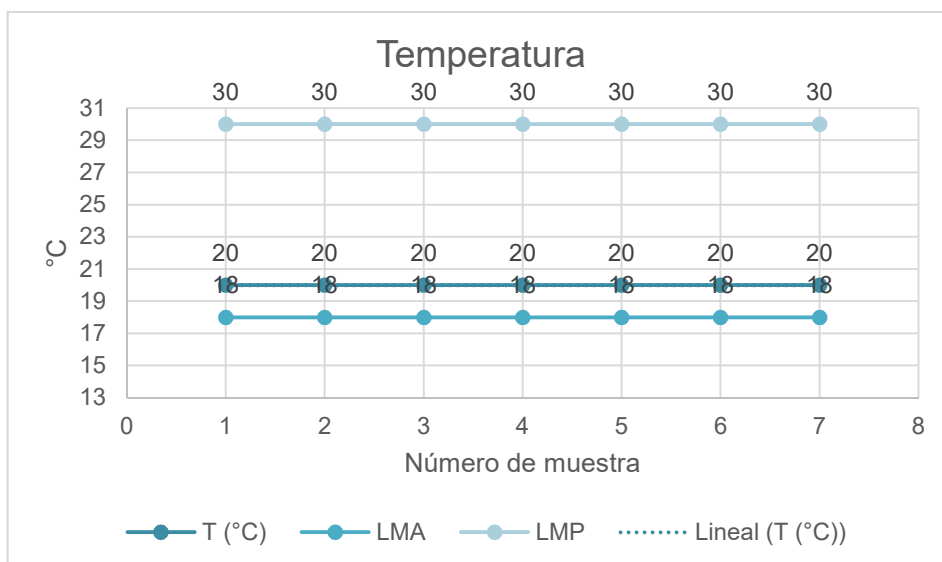
Apéndice 15. Comportamiento de la conductividad eléctrica. Fuente C



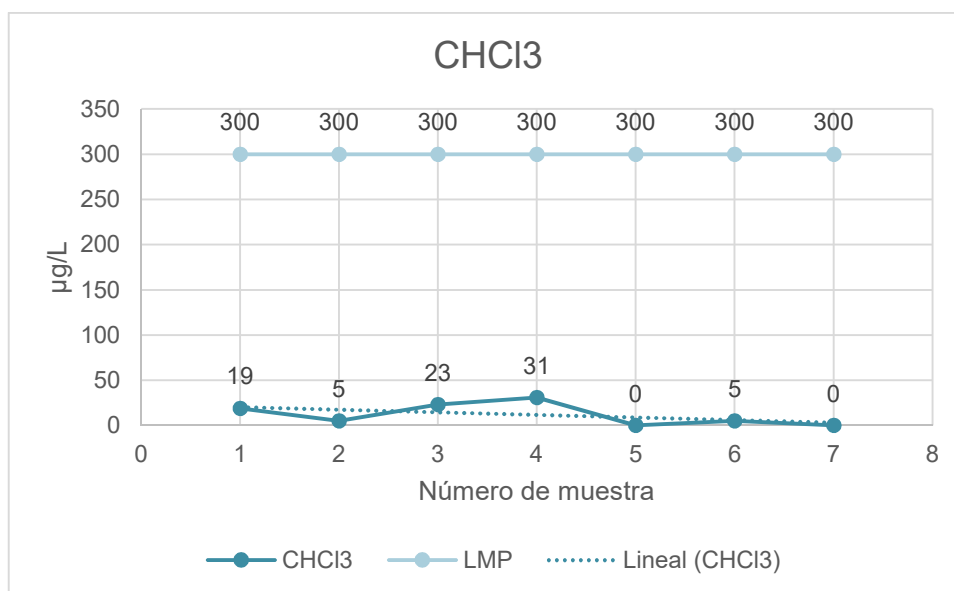
Apéndice 16. Comportamiento de los sólidos disueltos. Fuente C



Apéndice 17. Comportamiento de la temperatura. Fuente C



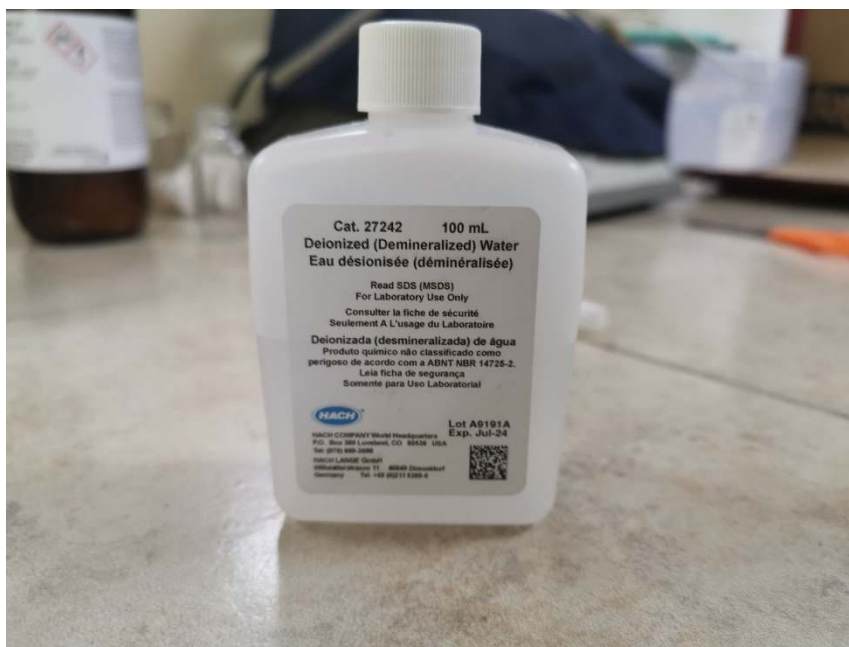
Apéndice 18. Comportamiento de CHCl_3 . Fuente C



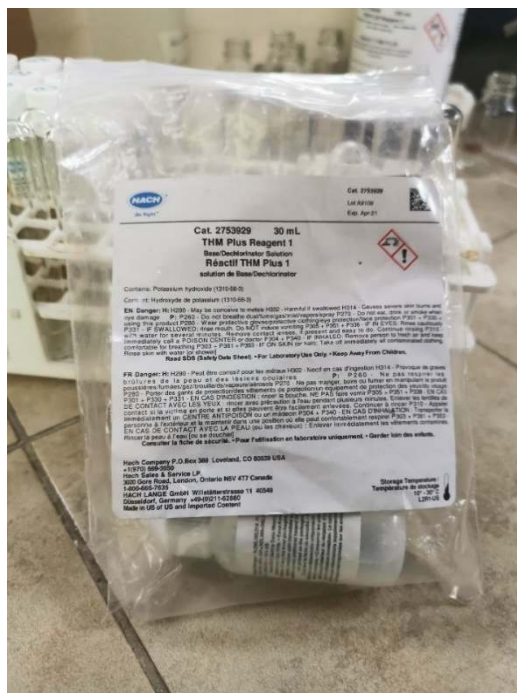
Apéndice 19. Fotografías del proceso de experimentación



Continuación de apéndice 19



Continuación de apéndice 19.



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