

Artículo científico

Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHM's) en agua para consumo humano, provenientes de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala.

Determination of the presence of total trihalomethanes (TTHM) in groundwater in Guatemala City utilized for drinking water.

Erikson Alexander Nuñez Cerrato

Universidad José Cecilio del Valle, Tegucigalpa, Honduras

Dirección para recibir correspondencia: erikson1980@outlook.com

Recibido 28.08.20 Aceptado 08.09.2020

Resumen

Este artículo presenta parte de los resultados de un trabajo más amplio encontrado en las referencias, cuyo objetivo fue evaluar si hay presencia de trihalometanos totales (TTHM'S) en concentraciones mayores a 80 µg/L, en aguas subterráneas utilizadas para el consumo de la población de la ciudad de Guatemala, donde se da a conocer que en dos de los cuatro puntos de muestreo hay presencia de TTHM's que sobrepasan los límites máximos permisibles -LMP- de 80 µg/L, según la National Primary Drinking Water Regulations (EPA, 2009). Se demostró que el aumento de TTHM's está relacionado con variaciones en el pH, el cloro residual, el tiempo de contacto, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos; a mayores concentraciones de estos parámetros se incrementan los niveles de TTHM's. Este análisis se realizó en cuatro puntos de la red de distribución zona sur de la ciudad, efectuando siete repeticiones por cada punto de muestreo con un intervalo de confianza del 95%. De las siete repeticiones en cada una de los puntos de muestreo se obtuvieron los siguientes datos: punto de muestreo No. 1, promedio de trihalometanos totales = 63 µg/L, desviación estándar = 5,22 µg/L, punto de muestreo No. 2, promedio de trihalometanos totales = 110 µg/L, desviación estándar = 50 µg/L, punto de muestreo No. 3, promedio de trihalometanos totales = 80 µg/L, desviación estándar = 13,34 µg/L, y punto de muestreo No. 4, promedio de trihalometanos totales = 212 µg/L, desviación estándar = 60 µg/L, los puntos de muestreo 1 y 3 no superan los -LMP-, mientras que los puntos de muestreo 2 y 4 no cumplen con los -LMP- según National Primary Drinking Water Regulations.

Palabras clave: Derivados potenciales de subproductos de la desinfección, cloroformo, materia orgánica natural, carbón orgánico disuelto.

Abstract

This article presents part of the results of a broader work found in the reference of the research work whose objective was to evaluate if there is presence of total trihalomethanes (TTHM'S) in concentrations greater than 80 µg / L, in groundwater used consumption of Guatemala City population, where is reported that in two of the four sampling points there is the presence of TTHM's that exceed the maximum permissible limits -LMP- of 80 µg / L, according to the National Primary Drinking Water Regulations (EPA, 2009). It was shown that the increase in TTHM's is related to variations in pH, residual chlorine, contact time, electrical conductivity and dissolved solids; at higher concentrations of these parameters, the levels of TTHM's increase. This análisis was performed in four points of the distribution network in the southern area of the city was analyzed, carrying out seven repetitions for each sampling point with a confidence interval of 95%. From the seven repetitions in each sampling point, the following data were obtained: sampling point No. 1, average total trihalomethanes = 63 µg / L, standard deviation = 5,22 µg / L, sampling point No. 2, average total trihalomethanes = 110 µg / L, standard deviation = 50 µg / L, sampling point No. 3, average total trihalomethanes = 80 µg / L, standard deviation = 13,34 µg / L, and sampling point No. 4, average total trihalomethanes = 212 µg / L, standard deviation = 60 µg / L, justifying that sampling points 1 and 3 are in the -

LMP-, while sampling points 2 and 4 do not comply with the -LMP- according to the National Primary Drinking Water Regulations.

Key words: Potential by-products of disinfection by-products, chloroform, natural organic matter, dissolved organic carbon.

Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que los trihalometanos (TTHM’s) se forman en el agua de consumo humano principalmente como consecuencia de la cloración que reaccionan con la materia orgánica natural presente en el agua. 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. Teniendo en cuenta los niveles máximos de referencia según las normas de calidad del agua de la (EPA, 2009) en la concentración de los TTHM’s mayores a 80 µg/L y demás parámetros analizados con la norma (COGUANOR NTG 29001, 2013) se realizó una comparación con los límites máximos admisibles -LMA- y los límites máximos permisibles -LMP- y comprobar si efectivamente hay formación o no de trihalometanos totales en las aguas subterráneas de la zona sur de la ciudad de Guatemala después del proceso de desinfección con cloro, para ello se recolectaron 4 muestras de agua en 4 puntos distintos de la red de distribución. Parámetros de control investigados; trihalometanos totales mediante el método HACH TTHM’s Plus (600 ppb), medido en cloroformo (CHCL₃) (ppb).

Antecedentes nacionales

En Guatemala se han realizado estudios para determinar la calidad de las aguas subterráneas servidas a la población y los posibles aportes contaminantes que puedan existir. Diariamente las autoridades encargadas del suministro monitorean la calidad de estas y analizan los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, no así los subproductos derivados del proceso de desinfección como son los TTHM’s, por lo que no hay estudios ni información sobre este compuesto que se forma en los procesos de tratamiento.

Internacionales

Diversos estudios como los de Hiriart, Hernández y Rojo (2007) titulado “Trihalometanos y Haloácidos en agua de la zona sur de la ciudad de México”, (Vallejo-Vargas, y otros, 2015) titulado “Determinación de Trihalometanos (THM’s) en aguas tratadas de la ciudad de Pereira” y otros a nivel internacional 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 cancerígenos para la salud de las personas. Un estudio publicado en enero por Evlampidou (2020), que tuvo como objetivo “evaluar los niveles de TTHM’s en el agua potable en la Unión Europea como un marcador de exposición a DBP’s y estimar la carga atribuible al cáncer de vejiga” en 28 países europeos. El periodo de estudio fue entre los años 2015 al 2019. El metanálisis internacional de estudios de casos y controles comprueba que los hombres expuestos a niveles medios anuales de trihalometanos mayores de 25 µg/L representan un riesgo de desarrollo de cáncer de vejiga del 3,4% al 40%. (Evlampidou, 2020)

Los parámetros de control analizados se han comparado con las normas de calidad del agua que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Normas de calidad de agua para consumo humano

| PARÁMETRO | UNID | GUIA US EPA | | COGUANOR NTG 29005 | |
|-------------------|-------|-------------|------|--------------------|-------|
| | | LMA | LMP | LMA | LMP |
| pH | Unid | 6,50 | 6,50 | 6,50 | 8,50 |
| Temperatura | °C | 18 | 24 | - | 28 |
| Sólidos disueltos | mg/L | 500 | 750 | 750 | 1,000 |
| Conductividad | µs/cm | - | 500 | 500 | 1,000 |

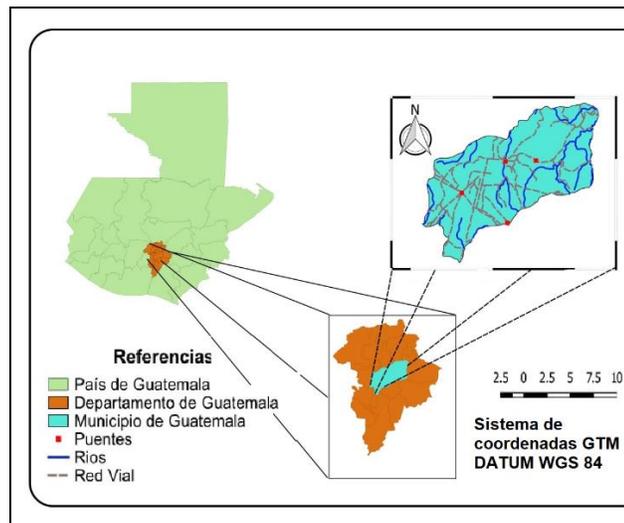
| PARÁMETRO | UNID | GUIA US EPA | | COGUANOR NTG 29005 | |
|----------------------------|------|-------------|-----|--------------------|-----|
| | | LMA | LMP | LMA | LMP |
| Cloro Residual | mg/L | - | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| TTHM's(CHCL ₃) | µg/L | - | 80 | - | - |

Fuente (EPA, 2009), (COGUANOR NTG 29001., 2013)

Área de estudio

El área de estudio ubicada en la ciudad de Guatemala; se encuentra en la latitud 14,6407204 y longitud -90,5132675, a una elevación promedio de 1,500 m.s.n.m., zona sur de la ciudad de Guatemala como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Mapa de ubicación



Fuente (SIG MAGA-ING, 2020). 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 que es una distribución de probabilidad de variables discretas que cuenta el número de éxitos en una

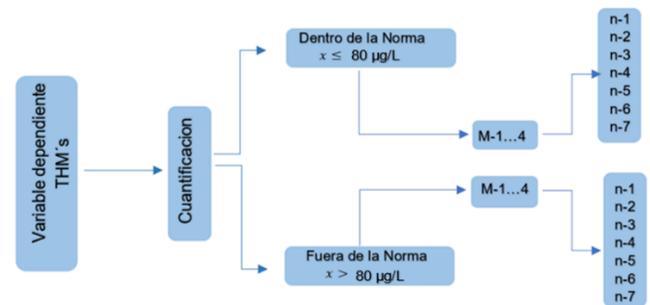
frecuencia de n ensayos independientes entre sí como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Numero de éxitos casos probabilísticos, Fuente

| 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 Núñez, Erikson 2020 pp 13

Figura 2. Diseño de muestreo



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 15)

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; por último, se describen los principales hallazgos en esta investigación.

Tablas de resultados

Según el diseño estadístico se escogieron 4 puntos de muestreo, en cada una estas 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 3 se presentan los resultados promedios para los 4 puntos diferentes de muestreo en las redes de distribución de agua subterránea que abastecen la zona sur de la ciudad.

Tabla 3. Resultados promedio

| Punto de muestreo | pH (Unid) | Cloro Residual (mg/L) | C.E. (µS/cm) | S.D. (mg/L) | TTHM's (µg/L) |
|-------------------|-----------|-----------------------|--------------|-------------|---------------|
| M-1 | 5,93 | 0,10 | 143,06 | 78,68 | 62,57 |
| M-2 | 7,61 | 0,50 | 180,64 | 99,35 | 109,71 |
| M-3 | 6,33 | 0,10 | 158,11 | 86,96 | 79,57 |
| M-4 | 7,67 | 0,60 | 262,09 | 144,15 | 211,86 |

Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 19)

En las tablas 4,5,6 y 7 se muestran los resultados obtenidos en el análisis individualmente

Tabla 4. Resultados primer punto de muestreo

| M-1 | pH (Unid) | C.E. (µS/cm) | S.D. (mg/L) | T (°C) | TTHM's (µg/L) |
|-----|-----------|--------------|-------------|--------|---------------|
| n-1 | 5,95 | 143,34 | 78,84 | 24 | 66 |
| n-2 | 6,00 | 143,02 | 78,66 | 24 | 64 |
| n-3 | 5,59 | 142,98 | 78,64 | 24 | 58 |
| n-4 | 5,94 | 143,41 | 78,88 | 24 | 60 |
| n-5 | 5,98 | 142,87 | 78,58 | 24 | 57 |
| n-6 | 6,09 | 142,92 | 78,61 | 24 | 61 |
| n-7 | 5,97 | 142,87 | 78,58 | 24 | 72 |

Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 20)

Tabla 5. Resultados segundo punto de muestreo

| 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 (Núñez, Erikson 2020 pp 20)

Tabla 6. Resultados tercer punto de muestreo

| 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 (Núñez, Erikson 2020 pp 21)

Tabla 7. Resultados cuarto punto de muestreo

| 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 | 253,81 | 145,10 | 24 | 120 |

Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 21)

La siguiente tabla muestra que tan bien siguen los datos la distribución binomial, para el conjunto de datos obtenidos y determinar si estos cumplen el supuesto de normalidad.

Tabla 8. Prueba de normalidad de datos

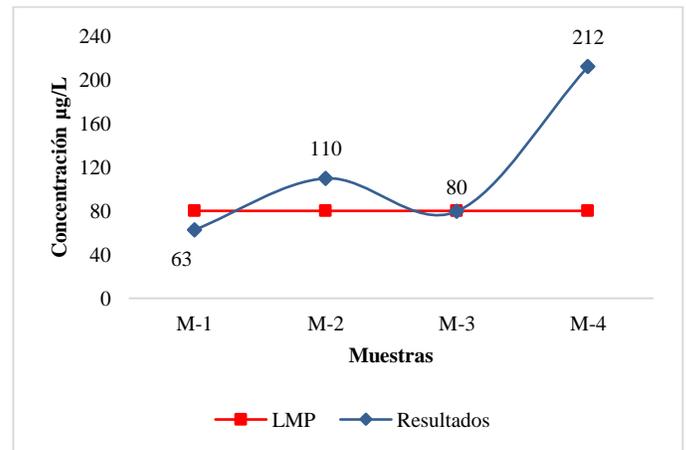
| Descripción | M-1 | M-2 | M-3 | M-4 |
|--------------|----------|---------|---------|----------|
| Valor P | 0,566 | 0,08 | 0,78 | 0,436 |
| Mediana | 62,57 | 109,71 | 79,571 | 211,86 |
| Desv. Est. | 5,224 | 49,98 | 13,34 | 59,91 |
| Varianza | 27,286 | 2497,57 | 177,952 | 3589,14 |
| Asimetría | 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 (Núñez, Erikson 2020 pp 22)

A continuación, se detalla gráficamente cada uno de los hallazgos encontrados en las 4 puntos de muestreo analizados y la comparación de los parámetros fisicoquímicos analizados como es; cloro residual, pH, conductividad eléctrica y solidos disueltos con las normas (COGUANOR NTG 29001., 2013) mientras que los -LMP- de TTHM's con la (USEPA, 2009).

En la figura 3 se muestra la variación en las concentraciones de trihalometanos encontrados en cada uno de los puntos de muestreo

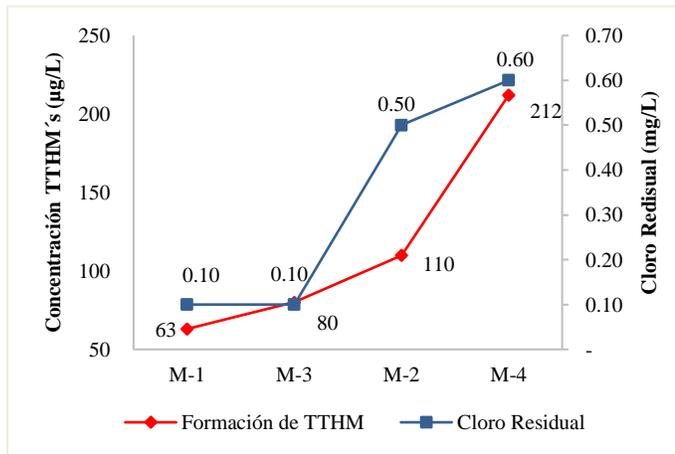
Figura 3. TTHM's promedio en los 4 puntos de muestreo



, Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 23)

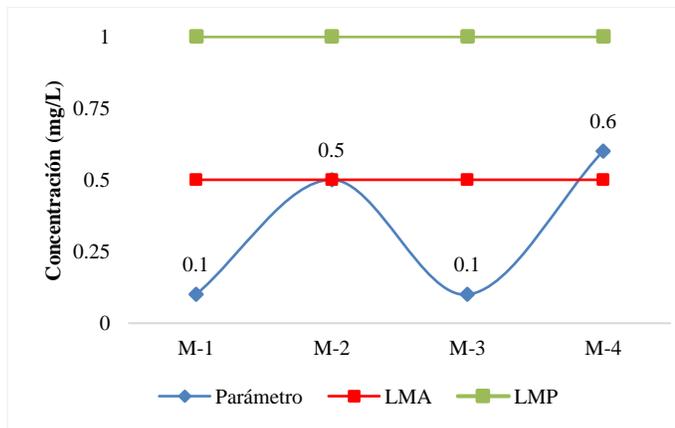
En la figura 4 se muestra como el incremento de los trihalometanos es favorecido con la concentración de cloro residual encontrado en cada punto de muestreo.

Figura 4. Atribución del cloro residual en la formación de TTHM's



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 24)

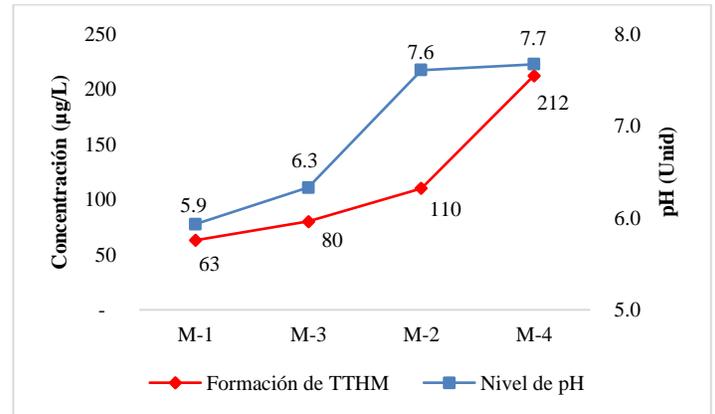
Figura 5. Demanda de cloro residual en los 4 puntos de muestreo



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 25)

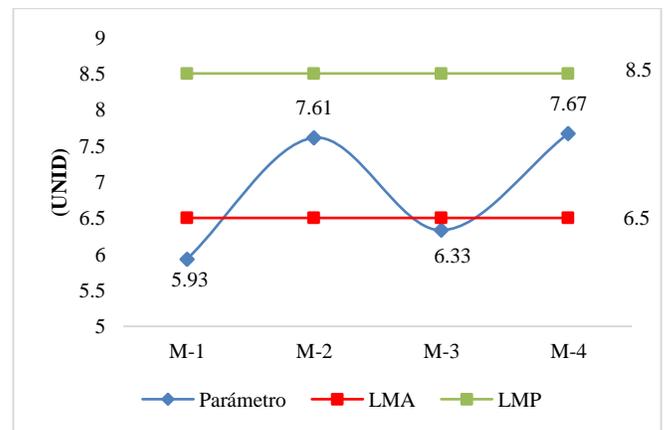
La alcalinidad o acidez son dos factores que contribuyeron al incremento de los niveles de trihalometanos como se observa en la figura 6.

Figura 6. Atribución del pH en la formación de TTHM's



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 26)

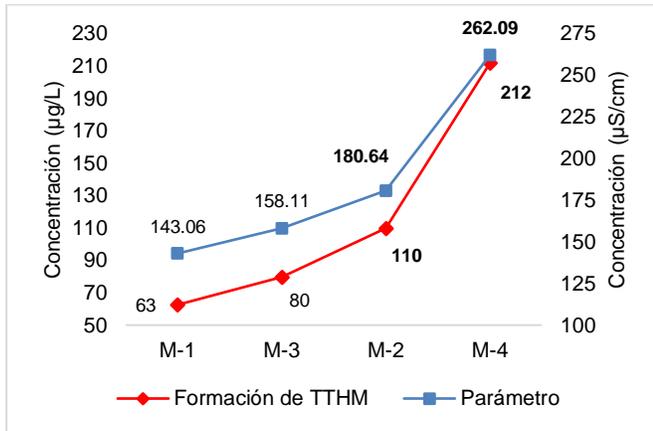
Figura 7. Potencial de hidrogeno en los 4 puntos de muestreo



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 27)

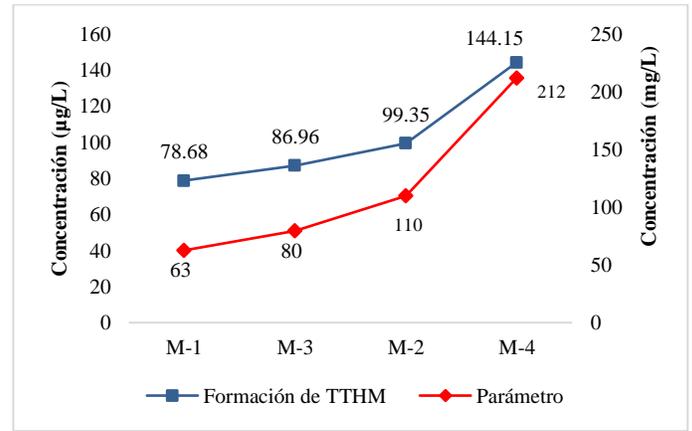
Siendo la conductividad eléctrica la capacidad de conducir corriente y por su relación con los sólidos disueltos observamos un comportamiento similar en los resultados obtenidos en cada una de las muestras como lo podemos observar en las figuras 8, 9, 10 y 11

Figura 8. Atribución de la conductividad eléctrica en la formación de TTHM's



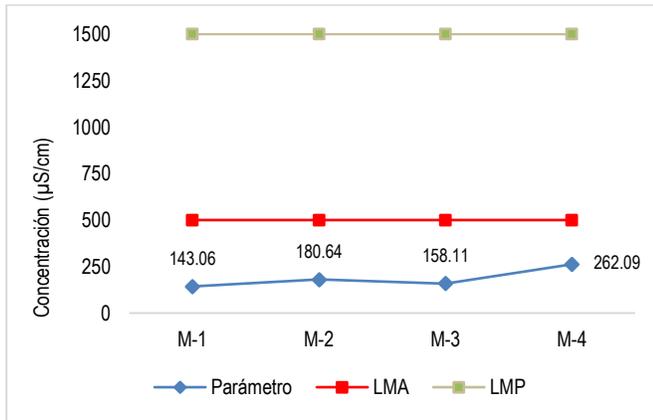
Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 28)

Figura 10. Atribución de los sólidos disueltos en la formación de TTHM's



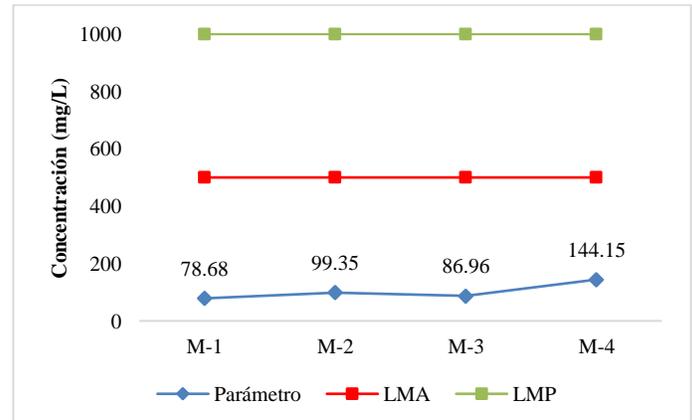
Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 30)

Figura 9. Conductividad eléctrica en los 4 puntos de muestreo



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 29)

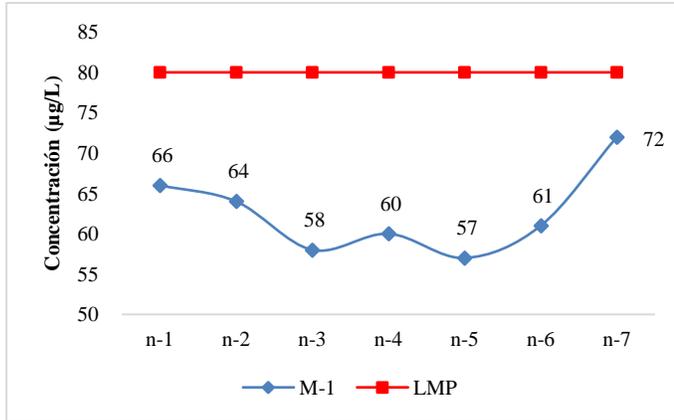
Figura 11. Sólidos disueltos en los 4 puntos de muestreo



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 31)

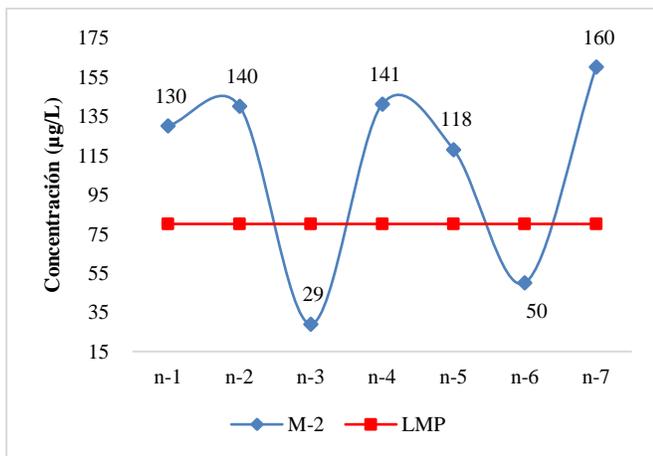
En las figuras 12, 13, 14, 15 se muestran los resultados obtenidos en 7 ensayos realizados a cada punto de muestreo y las variaciones que se dieron en el proceso de análisis.

Figura 12. Formación de TTHM's punto de muestreo No. 1



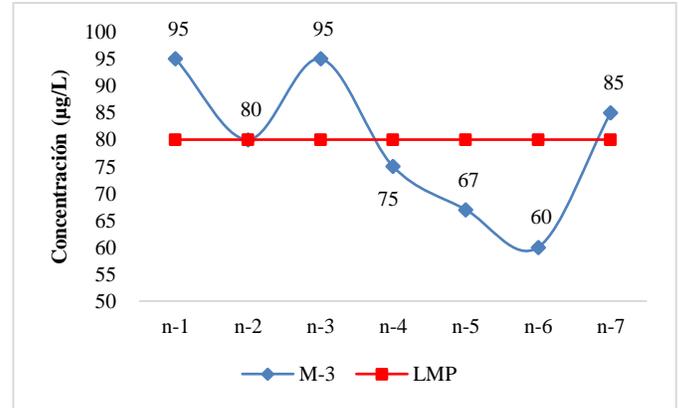
Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 43)

Figura 13. Formación de TTHM's punto de muestreo No. 2



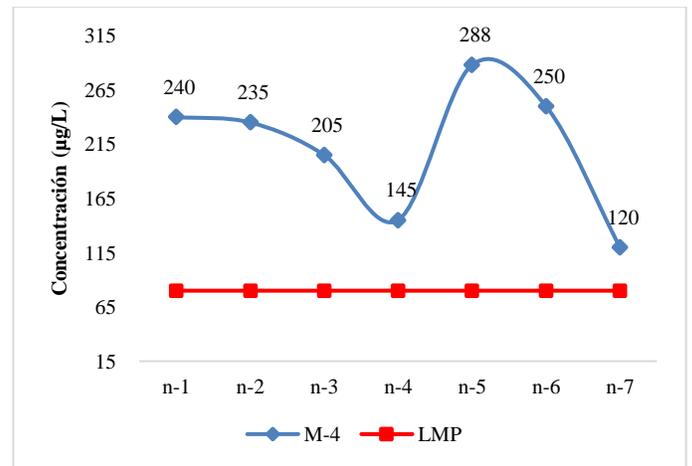
Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 44)

Figura 14. Formación de TTHM's punto de muestreo No. 3



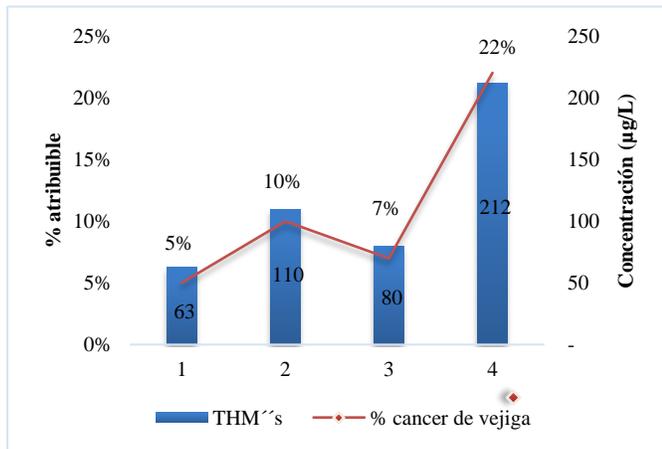
Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 45)

Figura 15. Formación de TTHM's punto de muestreo No. 4



Fuente (Núñez, Erikson 2020 pp 46)

Figura 16. Probabilidad de riesgo (cáncer de vejiga)



Fuente (Evlampidou, 2020)

Análisis de resultados

Los resultados en los 4 puntos de muestreo de agua subterránea son evidentes, hay presencia de compuestos organoclorados (TTHM's), el punto de muestreo 1 con 63 µg/L, siendo la que presenta menor formación de trihalometanos seguido del punto de muestreo 3 con 80 µg/L encontrándose bajo del -LMP-, mientras que los puntos de muestreo 2 y 4 presentaron un promedio de 161 µg/L, superando los -LMP- de 80 µg/L según norma de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, 2009).

Relación cloro residual – producción de trihalometanos totales.

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 cumplen con los -LMP- de 80 µg/L, normas (EPA, 2009), pero se asume que si desinfectan 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 µg/L y M-4 con 212 µg/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 µg/L de la (EPA, 2009), de igual manera se asume que si desinfectan es por presencia de microorganismos donde estos se encontraban en menor concentración que los puntos de muestreo 1 y 3, con una demanda de cloro promedio de 0.55 mg/L, por lo que los puntos de muestreo 2 y 4 si cumplen con los -LMA- de cloro residual de la norma COGUANOR NTG 29001.

Relación potencial de hidrogeno – producción de trihalometanos totales.

Los niveles de pH en los puntos de muestreo 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 acidas 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 los puntos de muestreo 2 y 4 presentaron valores de pH promedio de 7,6 unidades, que si están en el rango de los LMA y LMP . 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 nos 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 los puntos de muestreo 2 y 3.

Relación conductividad eléctrica - producción de trihalometanos totales.

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

concentración de sustancias por su relación con partículas ionizadas, encontrando el valor máximo en la M-4 con 262 $\mu\text{S}/\text{cm}$, M-2 = 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, M-3 = 158 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y M-1 con 143 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores que según norma (COGUANOR NTG 29001., 2013) establece (LMA= 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y LMP= 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), niveles bajos de conductividad eléctrica encontrados, esto se debe en algunas ocasiones por la exposición de gases atmosféricos como el bióxido de carbono o amoníaco, 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 aumenta la capacidad de conducción eléctrica, también la formación potencial de TTHM's, como se puede observar en la Figura 8.

Relación sólidos disueltos – producción de trihalometanos totales.

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 observa que el incremento de los sólidos disueltos producen un aumento de trihalometanos, donde los valores máximos encontrados en la M-4 y M-2 con 144 mg/L y 99 mg/L, los valores más bajos en la M-3 con 87 mg/L y M-1 con 77 mg/L, la norma (COGUANOR NTG 29001., 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.

Efecto de los trihalometanos en la salud de las personas.

Los estudios epidemiológicos realizados por la Organización Mundial de la Salud -OMS- han asociado que a determinadas exposiciones de TTHM's y en general a la exposición de subproductos de la desinfección tienen efectos sobre la salud de las personas como el cáncer de vejiga, riñón, colon y determinados defectos de nacimiento en recién nacidos de madres expuestas. Los estudios sobre el

cáncer de vejiga encuentran un incremento de riesgo debido a largas exposiciones de TTHM's (más de 10 años) a pesar de que los resultados no son siempre significativos. La Agencia Internacional de investigación sobre el cáncer (AIRC), clasifica el cloroformo como posible carcinógeno para los humanos en ciertas condiciones de exposición.

Los TTHM's pueden incorporarse al cuerpo humano por diversas vías: ingestión de agua del grifo, inhalación de los TTHM's evaporados y absorción dérmica. Independientemente de las actividades diarias de consumo de agua, el baño o la ducha, el baño en la piscina también puede contribuir a la exposición total a TTHM's. (OMS, 2011). Según el estudio publicado por Evlampidou (2020), que tuvo por objetivo "Evaluar los niveles de TTHM's en el agua potable en la Unión Europea como un marcador de exposición a DBP's y estimar la carga atribuible del cáncer de vejiga" se puede afirmar que los niveles de trihalometanos encontrados en las muestras de agua en la ciudad de Guatemala representan porcentajes significativos asociados al cáncer de vejiga como se puede ver en la figura 16.

Niveles de TTHM's > 25 $\mu\text{g}/\text{L}$ < 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ con un porcentaje de riesgo del 3,4%.

Niveles > 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ < 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ con un porcentaje de riesgo del 9%.

Niveles > 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ un riesgo mayor de 12 al 40%. (Evlampidou, 2020)

Conclusiones

Se comprobó afirmativamente que existe presencia de TTHM's en concentraciones mayores a 80 $\mu\text{g}/\text{L}$ en las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala. En los puntos de muestreo M-3 y M-4 con valores de 110 y 212 $\mu\text{g}/\text{L}$ respectivamente, mientras que los puntos de muestreo M-1 con 63 $\mu\text{g}/\text{L}$, por debajo del -LMP- y la M-2 en el valor límite de 80 $\mu\text{g}/\text{L}$. El incremento de TTHM's en las muestras de agua está atribuida con 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.

Es un hecho que el cloro genera formación de subproductos derivados de la desinfección como ser los TTHM's, este incremento se vio favorecido por las concentraciones de precursores orgánicos y las características fisicoquímicas que presentaron cada una de las muestras, por lo que es necesario un monitoreo constante y usar la desinfección como proceso de tratamiento siempre y cuando estas aguas subterráneas lo ameriten. En base a los resultados obtenidos de TTHM's existe la probabilidad 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 y especialmente el cáncer de vejiga.

Referencias

- Aguilar Carrera, F. A. (Agosto de 2017). Trabajo de graduación de doctorado. Análisis del proceso de fitorremediación con algas clorofitas en las estaciones depuradoras de agua residual, para mitigar los efectos de eutrofización de los cuerpos receptores. Guatemala, Guatemala: Escuela de Posgrado USAC.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Dublin, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Andreola, R., Mannigel, A., De Souza, G., Teixeira, T., Schmi, E., Jussara, R., . . . Manesco. (2018). Tratamientos de agua, subproductos de la cloración. Control de subproductos de desinfección en agua potable. Revista de Ingeniería Ambiental.
- Argueta Gálvez, J. E., & Blandón Blandón, R. A. (Agosto de 2016). Estudio especial. Modelo matemático para determinar el nivel de eficiencia de remoción de nutrientes a través del uso de algas clorofitas después de los filtros percoladores en tratamiento de aguas residuales. Guatemala, Guatemala: ERIS.
- Benaventes et al. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. Revista científica Universidad Autónoma de Coahuila.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Elsevier, 295-306.
- COGUANOR NGO 29005, .. (1999). Agua envasada para consumo humano. Guatemala.
- COGUANOR NTG 29001. (2013). Norma técnica Guatemalteca. Guatemala.
- Contreras, C., & et. al. (Agosto de 2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactor para el cultivo de microalgas. Scielo.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- EPA, E. P. (1997). Research Plan for Microbial Pathogens and Disinfection By-Products in Drinking Water. Research Plan for Microbial Pathogens and Disinfection By-Products in Drinking Water. EPA.
- Evlampidou, L. F.-R.-R.-L. (2020). Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the. Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the. ehp Environmental Health Perspectives, UE.
- Fenzel, N. (1989). En Nicaragua; Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología (págs. 5, 15 , 16, 30, 54). Belém: PIDL.
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants". The Netherlands.
- Galliguera. (s.f.). Explicación de las variables reportadas por la estación meteorológica Davis, Vantage Pro 2. Obtenido de http://galliguera.net/DatosClima/EXPLICACION_VARIABLES.html
- Guerra, H., & Zea, M. (Noviembre de 2015). Estudio especial. Identificación de algas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la PTAR de la USAC de Guatemala y de la PTAR Ing. Arturo P, para uso potencial en

- remoción de nitrógeno y fósforo. Guatemala, Guatemala, Guatemala: ERIS.
- Hernández, A., & Labbé, J. (Agosto de 2014). *Microalgas, Cultivo y Beneficio*. Vitacura, Región metropolitana, Chile: Revisga de biología marina y oceanografía.
- Hiriart, M. M., Hernández, E. C., & Rojo, C. y. (2007). *Trihalometanos y haloácidos en agua de la zona sur de la ciudad de México*. Xochimilco: Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.
- INETER. (1972). *Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA)*.
- INETER. (2004). *En Estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua* (págs. 26, 47). Managua, Nicaragua: COSUDE.
- INETER. (2012). *Boletín hidrogeológico*. Managua.
- Krasner, S. W. (1999). *Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water*. Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. American Water Works Association.
- MAG, MARENA, UNA, INAFOR, & INETER. (2015). *Atlas de Mapas Nacionales de Suelos, Uso Potencial, Coberturas y Usos de la Tierra y Conflictos de Uso de la Republica de Nicaragua*. Managua.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización* (1 ed.). Madrid: Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.
- Mona, A. (2013). *Sustainable algal biomass products by cultivation in waste water flows*. Espoo, Finland: VTT TECHNOLOGY 147.
- Moreno, A. (Mayo de 2008). *Fotobiorreactor cerrado como método de depuración de aguas residuales urbanas*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Morris, J., & Baum, B. (1978). *Precursors and mechanisms of haloform formation in the chlorination of water supplies*. Precursors and mechanisms of haloform formation in the chlorination of water supplies.
- Núñez, E. A. (2020). *Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHM's) en agua para consumo humano proveniente de aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala*. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Guatemala.
- OMS. (2011). *Guía para la calidad de Agua de Consumo Humano*. Ginebra.
- PNRH. (2017). *Diagnóstico Inicial de los Recursos Hídricos y Desarrollo de Líneas Estratégicas, Anexo 2 Componente Aguas Subterráneas*. Nicaragua: WORLD BANK GROUP.
- Ramírez Mérida, L. G., Queiroz Zepka, L., & Lopes, E.J. (2013). *Fotobiorreactor: Herramienta para el cultivo de cianobacterias*. Ciencia y Tecnología.
- Ramírez, O. L. (2012). *Investigación de la eficiencia de la etapas en serie del filtro percolador de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Usac*. Guatemala: Eris.
- Ramos, A. (2012). *Vulnerabilidad Hidrogeológica de la Cuenca El Sauce Usando el Método DRASTIC*. El Sauce, León: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Ramos, A. (2019). *Caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica y propuesta de plan de protección en función de la contaminación del agua subterránea, en el acuífero del valle de Achupapa, Nicaragua*.
- Romero, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Romo, A. (Diciembre de 2002). *Manual para el cultivo de microalgas*. (Tesis de pregrado) Universidad Autónoma de Baja California, Departamento de biología marina, La Paz.
- Ruiz, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente*. (Tesis de maestría).

Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Salazar, M. (23 de Noviembre de 2005). Laboratorio de microbiología ambiental y tratamiento de aguas residuales. Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. México, México: Depto. de biotecnología. UAM-I.

Salazar, M. (08 de Mayo de 2009). Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas. Iztapalapa, México.

Sawer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2001). Química para ingeniería ambiental. Bogotá, D.C, Colombia: McGraw-Hill, INC.

Stewart M. Oakley. (2005). Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad. Chico, California: Universidad Estatal de California.

Traña, M., Vázquez, B., & Bobadilla, O. (2002). Estudio Geofísico para el Proyecto Mapificación Hidrogeológica de la Región Central—Hoja Estelí. Managua.

Vallejo-Vargas, O. I., Beltrán, L., Franco, P., Montoya-Navarrete, C. H., Alzate Rodríguez, E. J., & Reyes, H. (2015). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida- cromatografía de gases en Pereira, Colombia . Bogota: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal .

Walpole, R. E. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

Wan, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., . . . Ruan, R. (9 de Noviembre de 2009). Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from municipal wastewater treatment plant. Minesota, USA: Center for Biorefining, and Department of Bioproducts and Biosystems Engineering.

Información del autor

Erikson Alexander Núñez Cerrato, graduado de ingeniero civil, facultad de ingeniería Universidad José Cecilio del Valle, Tegucigalpa, Honduras en el año 2015. Msc. en Ingeniería Sanitaria, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS-USAC año 2020.