



PHYSICO-CHEMICAL QUALITY AND ANALYSIS OF CHLORINATION FOR WATER SUPPLY IN ESPITA, YUCATAN †

[CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y ANÁLISIS DE LA CLORACIÓN PARA AGUAS DE ABASTECIMIENTO EN ESPITA, YUCATÁN]

Grisel A. Cervantes^{1*}, Camilo G. Chan¹, Nahomy J. Morales Arjonilla¹ and Eduardo Cejudo²

¹Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Valladolid. Carretera Valladolid-Tizimín Km. 3.5. Valladolid, Yucatán. México 97780. E-mail address: grisel.cc@valladolid.tecnm.mx

²CONACYT – CICY A.C. Unidad de Ciencias del Agua. Calle 8, No. 39, Mz. 29, SM 64. Cancún, Quintana Roo. México 77524.

*Corresponding author

SUMMARY

Background. It is undeniable the presence of many other contaminants in the food supply sources, in addition to the pathogens. **Objective.** The objective of this study was to analyze biogeochemical parameters to evaluate the quality of the water from the applied treatment and at the same time determine the ideal doses of chlorine for the disinfection of the supply waters in Espita, Yucatán. **Methodology.** The water quality was determined at sample points (i.e. houses in the areas adjacent to supply wells) during the months of August, October, November and December 2019. The biogeochemical parameters sampled were determined based on standardized methods for analysis of drinking water. **Results.** The free residual chlorine determined in the house-room samples presented lower elevations than necessary (0.10 to 0.25 mg / L) for a residual effect that mitigates the presence of pathogens. According to the comparative analysis, the means of the concentrations of free residual chlorine do not present statistical differences for the four supply wells, which led to a proposed sodium hypochlorite dose of 4.10 and 8.60 mg / L for 0.10 and 0.25 ppm respectively of free residual chlorine. The analysis of the results of the concentrations of ammonia nitrogen (N-NH₃) showed the existence of recent contamination in the third and fourth samples; for nitrate nitrogen (N-NO₃), specifically elevated concentrations were also found in the first and second sampling. **Implications.** This analysis is useful for local decision-makers as data-driven or proposed decisions can improve the provision of the water supply service. **Conclusions.** The results suggest contamination of the water by external agents, for example, from agricultural products such as fertilizers and wastewater from sumps connected to wells. No free chlorine concentrations were found that promote the residual effect, it is necessary to implement continuous verification.

Key words: Chlorination. Water supply systems. Groundwater. Water quality.

RESUMEN

Antecedentes. Se tiene evidencia de la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como de patógenos en las fuentes de abastecimiento. **Objetivo.** Este estudio tuvo como objetivo analizar parámetros biogeoquímicos para evaluar la calidad del agua a partir del tratamiento aplicado y al mismo determinar las dosis idóneas de cloro para la desinfección de las aguas de abastecimiento en Espita, Yucatán. **Metodología.** Se determinó la calidad del agua en puntos muestra (i.e. casas habitación en las zonas aledañas a pozos de abastecimiento) durante los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2019. Los parámetros biogeoquímicos muestreados se determinaron con base a métodos normalizados para el análisis de agua potable. **Resultados.** El cloro residual libre determinado en las muestras de casa habitación presentó elevaciones menores a las necesarias (0.10 a 0.25 mg / L) para un efecto residual que mitigue la presencia de patógenos. Según el análisis comparativo las medias de las concentraciones de cloro residual libre no presentan diferencias estadísticas para los cuatro pozos de abastecimiento, lo que derivó en una propuesta de dosis de hipoclorito de sodio de 4.10 y 8.60 mg / L para 0.10 y 0.25 ppm respectivamente de cloro residual libre. Los análisis de los resultados de las concentraciones de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) demostraron la existencia de contaminación reciente en el tercer y cuarto muestreo; para el nitrógeno de nitrato (N-NO₃) también se encontraron concentraciones elevadas específicamente en el primer y segundo muestreo. **Implicaciones.** El presente análisis es útil para los tomadores de decisiones locales pues las decisiones basadas en datos o propuestas pueden mejorar la prestación del servicio de abastecimiento de agua. **Conclusiones.** Los resultados sugieren contaminación del agua por agentes externos, por ejemplo, de productos agrícolas como los fertilizantes y aguas residuales de sumideros conectados a

† Submitted April 17, 2020 – Accepted September 26, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License. ISSN: 1870-0462.

pozos. No se encontraron concentraciones de cloro libre que propicien el efecto residual, es necesario implementar la verificación continua.

Palabras clave: Cloración. Sistemas de abastecimiento de aguas. Aguas subterráneas. Calidad de agua.

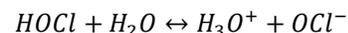
INTRODUCCIÓN

En un estudio para determinar la vulnerabilidad del acuífero Kárstico de Yucatán se determinó y clasificó mediante cuatro métodos la vulnerabilidad del área de estudio (Espita) y resultó moderadamente vulnerable (MV), altamente vulnerable (HV) y muy altamente vulnerable (VHV), de acuerdo a la litología, nivel freático, el tipo de suelo y la alta presencia de cenotes y grandes fisuras en la zona (Moreno, *et al.*, 2019). Entonces, los patógenos llegan fácilmente al manto freático si los efluentes residuales domésticos no son tratados adecuadamente. En las aguas residuales suelen haber diversos microorganismos, pero para razones de desinfección se dividen en tres amplios grupos: virus, bacterias y protozoarios (Howe, *et al.*, 2017). Así, el tratamiento de las aguas de abastecimiento es de gran importancia para evitar enfermedades infecciosas. Se han desarrollado cinco agentes de desinfección para potabilizar el agua: 1) cloro libre, 2) cloro combinado (combinado con amoníaco, también conocido como cloraminas), 3) dióxido de cloro, 4) ozono y 5) luz ultravioleta, teniendo el cloro libre una dosis de aplicación típica de 1 a 6 mg/L (Howe, *et al.*, 2017).

Uno de los métodos más usados para desinfectar es la cloración porque ha demostrado ser eficiente contra virus, hongos y bacterias. Lo anterior se debe a su bajo costo, confiabilidad y efectividad, pero sobre todo a que tiene un efecto residual que guarda después de ser aplicado; característica que otros métodos de desinfección no poseen (CONAGUA, 2016). Además, las técnicas de análisis de cloración son rápidas y confiables. La cloración en general tiene diversas ventajas por ejemplo en el tratamiento del agua de consumo, es decir mejora su calidad, pues el cloro (Cl) reacciona con el amoníaco (NH₃), hierro (Fe), manganeso (Mn), sulfuro (XS) y algunas sustancias orgánicas, pero, si la dosificación es errónea y existe presencia de algunas sustancias como los fenoles también puede intensificar el sabor y olor de materiales orgánicos en el agua (APHA, *et al.*, 1992). Entonces, al sobrepasar ciertos límites (que están sujetos a las características específicas del agua a clorar) llega a generar productos, como los trihalometanos (THM), que se forman a partir de la reacción del cloro con la materia orgánica natural (MON) y los cuales son clasificados como posibles cancerígenos humanos (Sawyer, *et al.*, 2000). Por lo tanto, es importante conocer el mecanismo de desinfección de la cloración, debido a que el cloro a pesar de ser un buen método para desinfectar el agua, y en consecuencia una barrera para combatir las enfermedades de origen hídrico que generan altos porcentajes de morbilidad y mortalidad

en la población (CONAGUA, 2016), es muy reactivo con los compuestos naturales presentes en el agua, los cuales pueden interferir con el proceso de desinfección. (Messina, 2006). Por lo tanto, es una necesidad innegable realizar muestreos y determinar periódicamente la demanda de desinfectante para dosificar de forma efectiva y cuidar la salud de la población.

La química del cloro elemental (Cl₂) presentada por Weber (2017), afirma que tiene una fuerte tendencia a reducirse desde su estado de oxidación cero al estado de oxidación -1. En disolución acuosa el cloro se desproporciona dando Cl⁻¹ y Cl⁺¹, que es termodinámicamente más estable, y donde la suma de los estados de oxidación del cloro en ambos lados de la reacción es idéntica [0+0=1+ (-1)]. Así, para el proceso de desinfección, es de mayor importancia el comportamiento químico del ácido hipocloroso (HOCl) formado por hidrolisis del cloro.



Por su parte de acuerdo a lo detallado por Manahan (2014) las dos especies químicas formadas por el cloro en el agua, HOCl y el ión hipoclorito (OCl⁻), se conocen como cloro libre disponible. El cloro libre disponible es muy eficaz para matar a las bacterias. En presencia de amoníaco se forma monocloramina NH₂Cl, dicloramina NHCl₂ y tricloramina NCl₃. A las cloraminas se les denomina, cloro combinado disponible y tiene capacidad desinfectante menor a la del ácido hipocloroso.

Howe, *et al.* (2017) describen el proceso de cloración añadiendo hipoclorito de sodio al agua, el HOCl es la forma predominante por debajo de 7.6 de pH y un OCl⁻ es la forma predominante por encima del mismo valor. El HOCl y OCl⁻ tienen capacidad de desinfección, pero el HOCl tiene una cinética de desinfección más rápida y, por consiguiente, es un desinfectante más potente que el OCl⁻. Por su parte, el mismo autor menciona que las reacciones de desinfección son reacciones de oxidación que convierten el cloro a ion cloruro mientras los microorganismos se neutralizan. Así, el cloro residual total es la suma del residual de cloro combinado y cualquier residual de cloro libre. Por lo tanto, en este proyecto se midió el cloro residual libre, HOCl y OCl⁻ con mayor capacidad desinfectante y porque en el municipio de Espita se clora con hipoclorito de sodio.

Las enfermedades infecciosas originadas por el agua se encuentran asociadas a microorganismos provenientes

de desechos fecales de humanos y de animales causando enfermedades intestinales como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, helmintiasis, y cólera, entre muchas otras (Comisión Nacional del Agua, 2018). El acceso a agua potable de calidad sin agentes patógenos es crucial para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población menor de cinco años; la disminución de enfermedades de transmisión hídrica, así como de afecciones resultantes del consumo de componentes químicos (arsénico, nitratos o flúor) (Comisión Nacional del Agua, 2018). En muestreos de estudios de calidad de agua, realizados en el estado de Yucatán durante 2002 y 2003 (Pacheco y Cabrera, 2013), la calidad microbiológica, de las muestras de agua de los sistemas municipales de abastecimiento, se clasificaron como aceptables en 45%, contaminadas en 23%, peligrosas en 18% y muy contaminadas en 14%. Por su parte el municipio de Espita fue parte del 23% en la categoría de aguas contaminadas, y aunque es muy probable la variación de las características del agua a nivel temporal, es innegable que ha existido riesgo para la salud pública, por lo que se debe cuidar y establecer como prioritaria la desinfección del agua para abastecimiento. A raíz del trabajo de campo, se observó que en Espita la cloración en diversas ocasiones se suministra sin análisis o determinaciones fisicoquímicos previos, por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo analizar parámetros fisicoquímicos para evaluar la efectividad del tratamiento y al mismo tiempo determinar las dosis idóneas de cloro para la desinfección de las aguas de abastecimiento en Espita, Yucatán. Las características de las aguas se midieron de muestras obtenidas de casas habitación, para estimar si existían diferencias en las dosis requeridas entre los pozos de abastecimiento y las concentraciones de las dosis que generen un efecto residual.

MATERIALES Y METODOS

Se realizó la toma de muestras de agua en 4 pozos de abastecimiento (Figura 1 y Tabla 1) para determinar las dosis idóneas para cloración y, por otra parte, en 7 tomas domiciliarias (Figura 1 y Tabla 2) de Espita, Yucatán, para el registro y análisis de parámetros fisicoquímicos en cada muestreo. Los muestreos realizados en los pozos de abastecimiento, fueron ejecutados en diciembre de 2019 y febrero de 2020. Los muestreos en las tomas domiciliarias se realizaron en los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2019. El tamaño de la muestra de las tomas domiciliarias se determinó con base en la norma PROY NOM-250-SSA1-2014 (SSA, 2014), “Agua para uso y consumo humano. Procedimiento sanitario de muestreo”, en esta se establece que para el monitoreo de parámetros residuales de las tomas domiciliarias se debe realizar una muestra por cada 2,500 habitantes cuando la población se encuentre entre el rango de 2,501 habitantes y 50,000 habitantes.

Para la población de Espita, Yucatán la cantidad de casas fueron siete pues tiene alrededor de 16,701 habitantes (Secretaría de Desarrollo Social, 2017). La razón de realizar 2 muestreos en los pozos y 4 en las casas habitación, se debió a que los muestreos en los primeros tuvieron como objetivo la realización de curvas para la determinación de la demanda de cloro y no un análisis comparativo con los parámetros obtenidos en las casas habitación. Entonces, el primer muestreo en los pozos fue exploratorio para las dosis de hipoclorito y el segundo fue definitivo para realizar una propuesta de dosis que tenga una concentración de cloro libre remanente.

Para la colecta de agua antes de cualquier proceso de tratamiento, se purgaron las tuberías de los pozos durante 3 min mediante las válvulas de salida de agua y se tomaron las muestras en bidones de 20 L previamente reposados en HCl al 15% durante 24 horas y aclarados con agua destilada.

Con el propósito de determinar las dosis para cloración se realizaron curvas de titulación para cada uno de los pozos de la siguiente forma: se añadió 1 L de agua a cada una de 15 botellas ámbar previamente lavadas, inmediatamente se añadieron a las muestras 0.8, 1.5, 2.3, 3, 3.8, 4.6, 5.4, 6.1, 6.9, 7.7, 8.4, 9.2, 10, 10.7, 11.5 mL respectivamente, de la solución con 1.95 mg/mL de hipoclorito de sodio. Estos volúmenes fueron determinados en pruebas previas. Cada dosificación se realizó con un intervalo de 10 min. Las muestras con cloro se cubrieron con papel aluminio y se dejaron reposar en una zona oscura durante 1 h.

Se determinó el cloro total y cloro libre en las muestras, empezando por la concentración más baja hasta la más alta. La medición de cloro total se realizó mediante el método yodo métrico (4500-Cl B) (APHA, *et al.*, 1992), en el cual el cloro libera yodo a partir de las soluciones de yoduro de potasio (KI) a pH 8 o inferior. El yodo libre se valoró con una solución patrón de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) usando almidón como indicador. Para la medición del cloro residual libre, tanto en las curvas de cloración de los pozos de abastecimiento como en las tomas de agua domiciliarias, se utilizó una adaptación del método EPA DPD 330.5 (United States Environmental Protection Agency, 1983) en la cual la reacción entre el cloro libre residual y el reactivo DPD causa una coloración rosada en la muestra. El análisis de cloro residual de las tomas domiciliarias se realizó inmediatamente después de tomada la muestra para evitar la volatilización del cloro, también se evitó el exceso de luz y agitación para obtener mejores resultados (APHA, *et al.*, 1992).

La toma de muestras de los grifos de las casas habitación para la medición de parámetros fisicoquímicos se realizó de acuerdo a la NOM-014-

SSA1-1993 (SSA, 1993). Las muestras se almacenaron en neveras que mantenían las muestras tomadas en botellas ámbar de 1 L previamente lavadas y a no más de 4°C. Con respecto al cloro residual si las concentraciones superaban el intervalo de detección del fotómetro se recurrió a diluciones agua destilada-muestra, en proporciones de 20:80. In situ los parámetros determinados fueron: conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxígeno (mg/L) y sólidos disueltos totales (mg/L) empleando el potenciómetro modelo HI98122-5 y el oxímetro AL200xiAQUALYTIC® en las tomas domiciliarias. Los análisis realizados en laboratorio fueron: nitrato por medio de la técnica de reducción de cadmio; el de nitritos por el método de diazotización para aguas claras de bajo rango y sulfato ferroso para alto rango; amoníaco por el método Nessler y cloro residual total método yodométrico; todos estos con técnicas basadas en los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, *et al.*, 1992) utilizando el fotómetro HI 83099 (HANNA, instruments México), el cual especifica los métodos de detección para cada analito.

Tabla 1. Coordenadas de pozos de extracción.

Pozo de extracción	Coordenadas	
Pozo 1 Sistema 1	N21 00.462	W88 17.719
Pozo 2 Sistema 1	N21 00.467	W88 17.691
Pozo 1 Sistema 2	N20 59.600	W88 18.421
Pozo 1 Sistema 3	N21 01.156	W88 18.345

Se realizó la estadística descriptiva y las gráficas de medias con su intervalo de confianza al 95% para los parámetros medidos, registrando la tendencia en los muestreos y presentando los más relevantes. Con el objetivo de reducir el error experimental, los muestreos se fijaron como bloques de tal forma que la aleatoriedad se presentó dentro de los mismos con respecto a los pozos, que mostraron una concentración de cloro libre determinada en función del cloro total y combinado. Entonces, se realizó el análisis de bloques completos con efectos intersujetos con un α 0.05, pues se requirió conocer si las dosis demandadas de los pozos eran diferentes debido a que la adición del reactivo usualmente se realiza de forma empírica y en las mismas dosis. Para conocer la dosis idónea por pozo se realizaron las regresiones de las curvas de NaClO (mg/L) contra el cloro residual (mg/L), con ajustes potencial, exponencial y logarítmico. El mejor valor de R^2 fue el potencial de tal forma que se linealizaron los valores de las dosis de hipoclorito y el

cloro residual aplicando logaritmo en base 10, para obtener las ecuaciones lineales. Una vez obtenidas las ecuaciones se determinaron las dosis para una máxima concentración de cloro libre residual.

Tabla 2. Coordenadas de tomas domiciliarias.

Muestreo 1 (agosto 2019)		
Zona	Coordenadas	
1	N21 00.576	W88 18.893
2	N21 00.364	W88 18.393
3	N21 01.334	W88 17.591
4	N21 00.151	W88 17.945
5	N21 00.312	W88 18.793
6	N21 00.881	W88 17.589
7	N21 00.661	W88 18.320
Muestreo 2 (octubre 2019)		
Zona	Coordenadas	
1	N21 00.576	W88 18.893
2	N21 00.364	W88 18.393
3	N21 01.357	W88 17.721
4	N21 00.179	W88 17.933
5	N21 00.311	W88 18.791
6	N21 00.881	W88 17.589
7	N21 00.685	W88 18.336
Muestreo 3 (noviembre 2019)		
Zona	Coordenadas	
1	N21 00.592	W88 18.896
2	N21 00.363	W88 18.392
3	N21 01.336	W88 17.592
4	N21 00.179	W88 17.934
5	N21 00.312	W88 18.791
6	N21 00.880	W88 17.588
7	N21 00.685	W88 18.336
Muestreo 4 (diciembre 2019)		
Zona	Coordenadas	
1	N21 00.592	W88 18.896
2	N21 00.350	W88 18.401
3	N21 01.330	W88 17.843
4	N21 00.179	W88 17.934
5	N21 00.312	W88 18.791
6	N21 00.881	W88 17.589
7	N21 00.575	W88 18.330

RESULTADOS

El cloro libre muestreado en casas habitación no sobrepaso la concentración de 1.5 mg/L señalado en la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1994), presentando una media de 0.067 mg/L . La Tabla 3 presenta la estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos durante los 4 muestreos. El pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y sólidos disueltos totales no presentaron diferencias entre las concentraciones de los puntos de muestreo, solo llamó la atención el pH con un valor de 5.7 menor al rango

de 6.5-8.5 esperado para aguas de abastecimiento (Z7-4° muestreo). Sin embargo, los sólidos disueltos totales y razonablemente la conductividad mostraron un incremento en el muestreo del mes de noviembre.

En la Figura 2 se puede observar una leve tendencia de incremento del nitrógeno amoniacal del mes de agosto al mes de noviembre, a diferencia de la tendencia del nitrato que decrecimiento del mes de octubre a diciembre y por último el nitrito que mantuvo una desviación mínima durante los meses de muestreo, salvo en el mes de octubre.

La figura 3 muestra la comparativa de los resultados obtenidos de cloro libre residual en las curvas de cloración para los cuatro pozos de abastecimiento en Espita, Yucatán. La prueba de DBCA ($\alpha=0.5$) tanto para los muestreos ($p=0.150$) como para los pozos ($p=0.856$), indicaron aceptar las hipótesis: H_{01} Las concentraciones de demanda de cloro serán iguales en los diferentes pozos de extracción y H_{02} Las concentraciones de demanda de cloro serán iguales en los diferentes muestreos. Así, el cloro residual libre no es estadísticamente diferente para los muestreos y pozos con una media total de 0.9368 ± 0.5933 que para todas las curvas tuvo un máximo total de 2.1 mg/L y mínimo estadístico de 0.02 mg/L, de tal forma que mediante un ajuste es posible realizar una regresión para determinar la dosis que no sobrepase el valor máximo de 1.5 mg/L de cloro residual libre (Figura 4).

En la Tabla 4 se presenta el resumen de las ecuaciones obtenidas para los cuatro pozos muestreados, como se observa, las de mejor ajuste son la lineal y la potencial con valores de R^2 superiores a los ajustes logarítmico y exponencial, que con la eliminación de los dos valores atípicos observados en la figura 3 se obtuvo un R^2 de 0.94. Sin embargo, también se determinó la dosis mediante el ajuste potencial linealizado de las curvas obtenidas por muestreo y asociada al pozo correspondiente, debido a que presentaron los mejores coeficientes de determinación reflejando mayor bondad de ajuste y por lo tanto fiabilidad para determinar la dosis de hipoclorito de sodio con base al cloro residual libre deseado, después de aproximadamente una hora de contacto para eliminar patógenos (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Durante los muestreos se determinaron concentraciones apreciables de nitrógeno amoniacal, debido a esto no se recomienda en el sistema municipal de Espita el método de cloraminación, es decir, adicionar amoníaco durante la desinfección. El nitrógeno amoniacal presente después del tratamiento puede reducir la eficiencia de la desinfección, ocasionar la formación de nitrito en sistemas de distribución, y producir problemas de olor y sabor (Organización Mundial de la Salud, 2018), por lo que es ideal verificar periódicamente su concentración en zonas con potencial uso agrícola y ganadero como Espita. Para probar la efectividad de la cloraminación

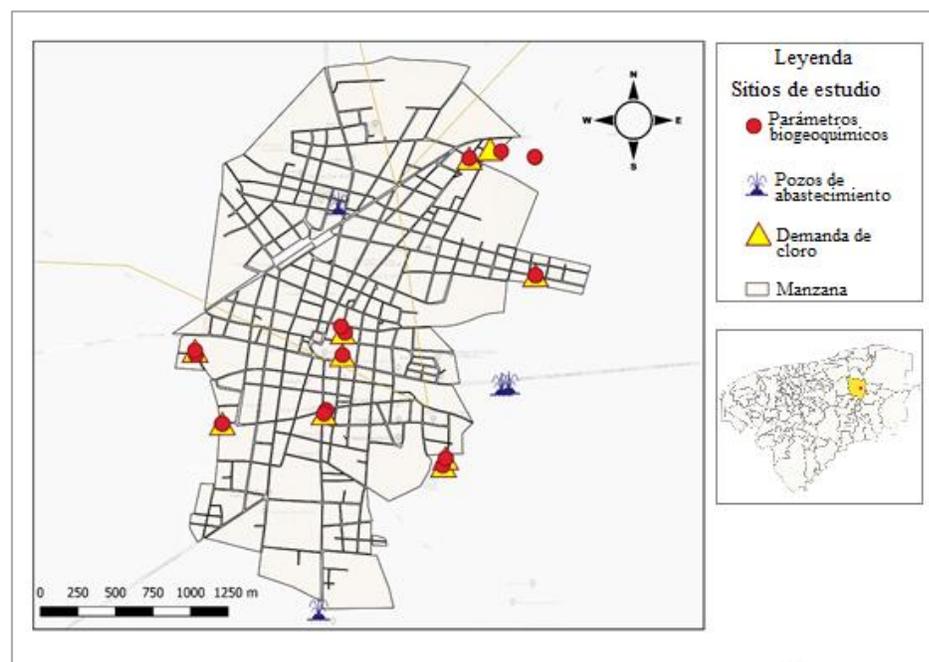
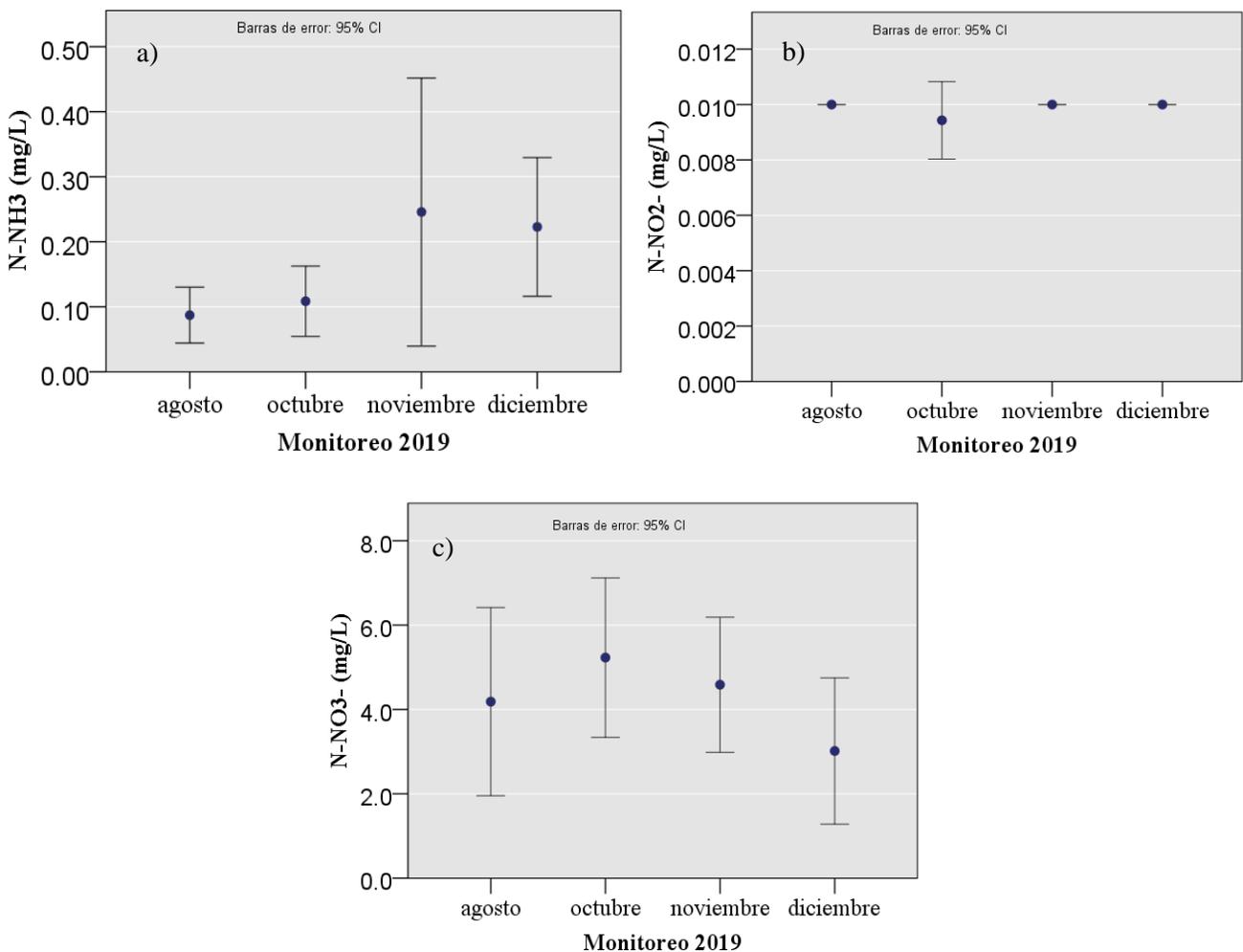


Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios de estudio en Espita, Yucatán. Elaboración propia con base en datos del INEGI.

Tabla 3. Estadística descriptiva de los parámetros biogeoquímicos del agua durante los 4 muestreos en 7 zonas de muestreo.

Parámetros	Rango	Promedio	Desviación estándar
pH	2.000	7.211	0.362
Temperatura (°C)	10.500	30.286	2.248
O ₂ (mg/L)	28.700	44.018	8.434
Conductividad (µS/cm)	560	1092.500	115.040
TDS (mg/L)	270	535.710	53.709
N-NH ₃ (mg/L)	0.730	0.166	0.142
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.0040	0.0098	0.0007
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	8.000	4.254	2.084

**Figura 2.** Concentraciones de a) Nitrógeno amoniacal (N-NH₃ en mg/L), b) Nitrógeno de nitrito (N-NO₂⁻ en mg/L) y c) Nitrógeno de Nitrato (N-NO₃⁻ en mg/L) en aguas domiciliarias del municipio de Espita, Yucatán.

en microorganismos, existen investigaciones recientes, por ejemplo, para determinar la actividad oxidativa de arqueas y bacterias en sistemas de cloración con amoníaco (Roy, *et al.*, 2020). La cloraminación tiene ventajas, como una mayor permanencia y estabilidad que el cloro libre, produce menos subproductos como los trihalometanos, objeto de estudio en países con fuentes de abastecimiento contaminados con excesos de materia orgánica, porque pueden ocasionar efectos negativos en la salud, como el cáncer y efectos teratogénicos, defectos cardiacos, respiratorios y urinarios (Fang Hwang, *et al.*, 2002). Sin embargo, el cloro libre es excelente para la eliminación de virus y bacterias, mientras que la cloraminación es buena para bacterias y suficiente para los virus. Entonces, este último mecanismo de desinfección será eficiente, siempre y cuando se controle la contaminación por materia orgánica, para evitar generar subproductos dañinos, sobre todo en la península de Yucatán con un acuífero altamente vulnerable a la contaminación.

Independientemente del método de desinfección empleado, hallar las concentraciones para el tratamiento de agua en sistemas municipales es cuestión de seguridad, de ahí la importancia de aplicar

técnicas de análisis considerando la temporalidad, que arrojen resultados sobre dosis efectivas, porque la concentración de contaminantes puede variar en las escalas temporal o espacial. A raíz de lo anterior, cada estudio de calidad de agua ejecutado, es un recurso para la toma de decisiones, del uso y protección del recurso hídrico. Los estudios de calidad de agua en la región oriente del estado de Yucatán siguen siendo escasos. Recientemente se han estudiado la potencial influencia de la temporada de lluvia en la calidad de agua potable y usos de la tierra, contrastándose las siguientes cuestiones: el agua subterránea es diluida en la temporada de lluvias; no todos los parámetros fisicoquímicos medidos durante las temporadas presentan el mismo comportamiento; la química de los pozos someros se ve más afectados que los pozos de abastecimiento municipal; y por último los diferentes usos que tiene el territorio de estudio influyen en la calidad del agua que se tiene en cada pozo municipal muestreado (Long, *et al.*, 2018). Todos los temas anteriores son fundamentales, pero es necesario realizar más análisis de la efectividad de los tratamientos desinfectantes en las aguas de consumo. Contar con programas de monitoreo de parámetros fisicoquímicos de los pozos de suministro público para

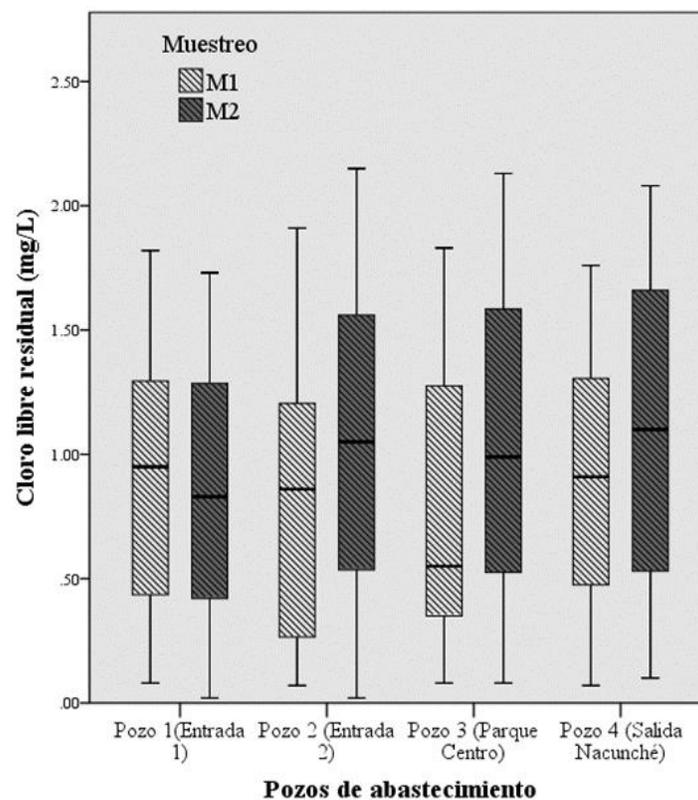


Figura 3. Comparación espacial del cloro libre residual obtenido de las curvas de titulación de las aguas de pozos de extracción de Espita, Yucatán, para encontrar dosis de NaClO en mg/L.

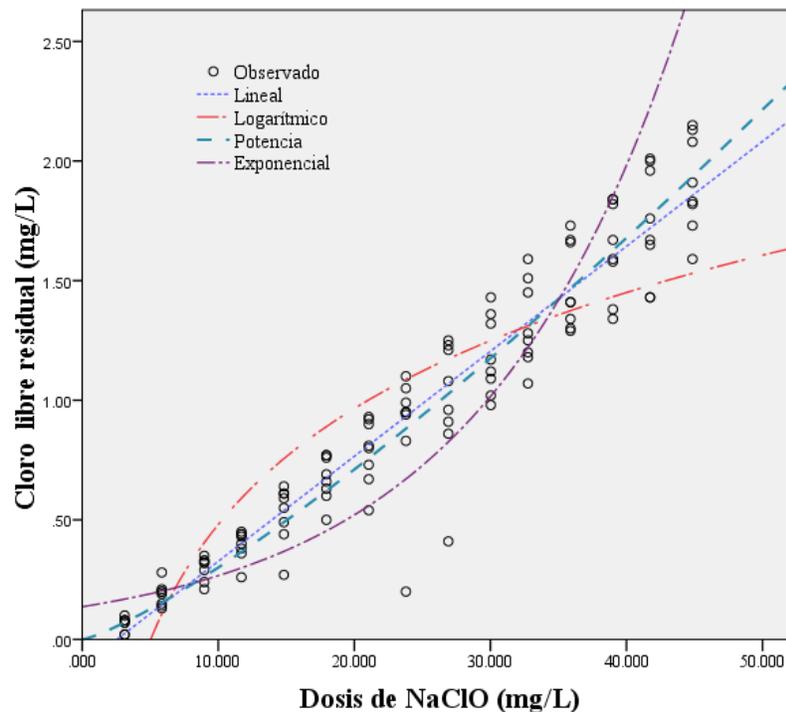


Figura 4. Regresión de las concentraciones de cloro libre residual de las curvas de titulación contra el NaClO dosificado para encontrar la demanda.

Tabla 4. Modelos de cloro residual libre.

Variable dependiente: Cloro residual libre (mg/L)				
Ecuación	Resumen del modelo		Estimaciones de parámetro	
	R ²	Ecuación	Constante	b1
Lineal	0.923	$y = 0.044x - 0.1120$	-.112	.044
Logarítmico	0.792	$y = 0.700 \log_{10} x - 1.130$	-1.130	.700
Potencial	0.925	$0.017x^{1.240}$.017	1.240
Exponencial	0.786	$0.137e^{0.067}$.137	.067

La variable independiente es dosis de hipoclorito de sodio (mg/L).

Tabla 5. Dosis de NaClO (mg/L) determinada mediante el ajuste lineal de la ecuación con mejor valor de R².

Muestreo	Pozo	Ecuación de ajuste potencial linealizado	R ²	NaClO mg/L (0.10 ppm de cloro residual libre)	NaClO mg/L (0.25 ppm de cloro residual libre)
1	1	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.2629 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.8442$	0.96	4.66	9.62
	2	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.2243 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.753$	0.99	4.12	8.71
	3	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.0306 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.5693$	0.80	3.56	8.68
	4	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.1475 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.6315$	0.98	3.55	7.89
2	1	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.343 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.9433$	0.88	5.03	9.97
	2	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.5457 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 2.1293$	0.94	5.37	9.72
	3	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.2159 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.6635$	0.99	3.51	7.46
	4	$\log_{10} \text{ cloro residual} = 1.1539 \text{ Log}_{10} \text{ dosis NaOCl} - 1.5634$	0.99	3.07	6.80

construir bases de datos, y manejo geoestadístico, son de gran importancia en países con sistemas kársticos, para evaluar el estado hidro geoquímico de las aguas subterráneas a fin de administrar y salvaguardar los recursos de agua potable para su aprovechamiento sustentable (Mendizabal *et al.*, 2011) así mismo, algunos países además monitorean el cloro residual en sus redes de sistema de abastecimiento. Por ejemplo, en India, con cloro residual 0.27 ± 0.7 mg/L (Philipp, *et al.*, 2019) y Pakistán (Hashmin, *et al.*, 2009) con 0.27 ± 0.42 mg/L, se monitorean datos que se correlacionan con los coliformes totales para evaluar efectividad.

Por otra parte, países como China, se invierte para realizar investigación sobre el efecto de una segunda cloración en el crecimiento de las bacterias patógenas, empleándose innovadores analizadores portátiles rápidos de cloro residual que tienen un rango de medida de 0.01-5mg/L (Zhao, *et al.*, 2020).

En otros estudios se pretende estudiar la efectividad de los sistemas de cloración para la desinfección e inactivación de virus y bacterias resistentes como *Cryptosporidium hominis* y *Giardia lamblia* presentes en fuentes de abastecimiento en países en vías de desarrollo como Panamá (Orner *et al.*, 2017).

En Canadá se ha demostrado (Rand, *et al.*, 2014) que el mantenimiento de una concentración de cloro libre de 0.30 mg/L o superior reduce sustancialmente la aparición de bacterias heterotróficas que pueden superar las 500 UFC/ml. El mismo autor señala que este residual es más alto que la pauta establecida en 0.20 mg/L de cloro libre, pero los datos se pueden utilizar hasta conocer el sistema de abastecimiento con el enfoque de suministrar agua de alta calidad para optimizar el rendimiento. Por su parte, en comparación con la concentración de 0.30 mg/L, en este proyecto se propone concentraciones de cloro residual de hasta 0.25 mg/L, por lo que es necesario implementar estudios microbiológicos para complementar los estudios fisicoquímicos.

En el municipio de Espita, los resultados de las determinaciones de cloro libre, presentaron una media de 0.067 mg/L, que para los valores obtenidos el 71.43 % se encontró por debajo de 0.10 mg/L de cloro residual, indispensable para mitigar la proliferación de patógenos en el agua y debajo del necesario para tener un efecto residual desinfectante.

En el estado de Yucatán se ha determinado la calidad bacteriológica del agua subterránea en los pozos de

abastecimiento de las cabeceras municipales y en el 83.1% de los pozos muestreados los coliformes totales y fecales excedieron los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1994); el municipio de Espita fue parte del porcentaje que sobrepasa límites permisibles (Méndez, *et al.*, 2015). Lo anterior destaca la necesidad de atender la eficacia de la desinfección con los recursos al alcance, pues, en algunos países no toda la población cuenta con acceso al agua potable, por diversas razones tales como la falta de: electricidad, infraestructura, conocimientos técnicos, recursos económicos, o de suministro de productos químicos para la desinfección.

En referencia a los resultados de las concentraciones de los parámetros que sobrepasaron los límites permisibles. En primera instancia para el nitrógeno amoniacal, la concentración detectada de 0.74 mg/L indica clara contaminación, pues las concentraciones naturales en aguas subterráneas suelen ser menores a 0.2 mg/L (Organización Mundial de la Salud, 2018) y los niveles elevados de amoníaco sugieren la presencia de contaminantes más graves, como patógenos, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, productos de limpieza o plaguicidas (Zhang, *et al.*, 2012) este último presumible en la zona de estudio, porque el municipio de Espita se dedica a la agricultura y ganadería como principales actividades económicas. El nitrógeno amoniacal presente antes del tratamiento es óptimo para la desinfección terciaria, debido a la formación de cloro combinado, pero la presencia posterior podría disminuir la eficacia, pues propicia la formación de nitritos y posteriormente nitratos, y aunque en este estudio los valores de nitrito no sobrepasaron los 0.05 mg/L, en el primer y segundo muestreo se detectaron 2 zonas con valores de 9 y 9.1 mg/L de nitrato debajo de 10 mg/L como límite, pero suficientemente alto para presumir a partir de estos parámetros muestreados tanto contaminación antigua como reciente. Pues, de acuerdo a Ramírez (2011) las concentraciones de nitrato por arriba de 5 mg/L indican contaminación no reciente, ya sea por desechos domésticos, de animales o la escorrentía, razonablemente aplicable a los resultados encontrados para el nitrato 4.254 ± 2.084 mg/L.

Los campos de pozos de abastecimiento en Yucatán se han medido para encontrar patrones espaciales y temporales de iones mayoritarios o de contaminantes, los niveles elevados de nitratos presentes en el agua subterránea de Yucatán son atribuidos a las actividades agrícolas, por el uso de fertilizantes para el pastoreo de ganado y el cultivo de hortalizas (Pacheco, *et al.*, 2001). Estudios realizados en la zona oriente indican

que recibe entre 800-1200 mm de precipitación en temporada de lluvias, debido a la lixiviación que ocasionan las intensas lluvias incrementa el riesgo de transporte de materia orgánica al acuífero (Delgado, *et al.*, 2010) que son la fuente de agua para potabilización. Además, el crecimiento de la población en las principales ciudades de la Península de Yucatán, así como las actividades turísticas significarían un aumento del consumo público, doméstico e industrial del recurso agua, según las proyecciones de afectación del cambio climático en la recarga del acuífero al año 2030 (Rodríguez, *et al.*, 2019) de ahí la importancia de optimizar el tratamiento del agua y evitar enfermedades transmitidas por esta.

De acuerdo a los resultados de cloro residual, es indispensable que se comprenda la importancia de cuidar el abastecimiento de cloro para la desinfección correcta del agua con el fin de evitar riesgo a la salud de la población. La efectividad de la cloración es directamente proporcional al control que se ejerza para asegurarse de proporcionar la dosis adecuada al caudal de abastecimiento. La creciente contaminación aumenta la cantidad de cloro a dosificar, por lo tanto, es necesario el monitoreo constante de la calidad de agua y análisis para determinar los niveles necesarios sin sobrepasar las dosis y aunado a la contaminación orgánica generar subproductos que afectan a la salud de la población. Con estas técnicas y equipo adecuado se puede capacitar inclusive a personal no especializado para verificar sistemas de desinfección.

CONCLUSIONES

Al analizar parámetros fisicoquímicos para evaluar la calidad del agua a partir del tratamiento aplicado en el sistema municipal, los resultados de las concentraciones de nitrógeno amoniacal demostraron la existencia de contaminación reciente en el tercer y cuarto muestreo; para el nitrato también se encontraron concentraciones elevadas específicamente en el primer y segundo muestreo. En Yucatán el uso de sumideros para captar los efluentes de aguas residuales es muy común, además Espita es un municipio dedicado a la agricultura y también existe presencia de pequeñas parcelas aledañas a las casas. Por lo tanto, es razonable concluir que existe infiltración de agroquímicos como los fertilizantes y de las aguas residuales de sumideros conectados a pozos.

El cloro residual libre determinado en las muestras de casas habitación presentaron concentraciones menores a las necesarias para un efecto residual que mitigue la presencia de patógenos. Según el análisis comparativo las medias de las concentraciones de cloro residual libre no presentaron diferencias estadísticas

significativas tanto para los puntos de muestreo, como para la temporalidad, por lo que es posible empezar la implementación del proceso de cloración de forma homogénea en los pozos. Así, al determinar las dosis idóneas de cloro para la desinfección de las aguas de abastecimiento en Espita, Yucatán, las concentraciones de hipoclorito de sodio para la presencia de 0.10 y 0.25 mg/L de cloro residual libre son de 4.10 y 8.6 mg/L respectivamente, obtenidas mediante ajustes potenciales linealizados de curvas de cloración.

Este estudio se limita a parámetros fisicoquímicos, por lo que en un futuro sería idóneo aplicar estudios microbiológicos y de determinación de subproductos de desinfección. Por último, se reconoce la necesidad de implementar campañas de educación ambiental con el fin de concientizar sobre el uso de productos agrícolas y la descarga de efluentes residuales, debido a que la contaminación compromete la calidad del agua subterránea para consumo e incluso dificulta su tratamiento.

Agradecimientos

Al gobierno municipal de municipio de Espita, Yucatán por permitir acceso a los pozos de abastecimiento y toma de muestras de agua. Al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Valladolid por las gestiones de vinculación.

Financiamiento. No existió financiamiento a raíz de convocatorias. El ITSVA facilitó el uso de instalaciones, equipos y materiales.

Conflicto de interés. Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Cumplimiento de estándares de ética. No es aplicable a esta investigación.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor de correspondencia Grisela Anahí Cervantes Cocom, grisel.cc@valladolid.tecnm.mx, previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA & WPCF, 1992. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S. A.
- Comisión Nacional del Agua, 2018. *Estadísticas del agua en México*. [En línea] Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf [Consultado el 20 de julio de 2020]

- CONAGUA, 2016. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento*. México D.F: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales ISBN: 978-607-626-023-4.
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R. y Bautista, F., 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: the case of Yucatán, México. *Agricultural Water Management*, [e-journal] 97(10), pp. 1423-1433. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.006>
- Fang, B., Magnus, P. y Jaakkola, J., 2002. Risk of Specific Birth Defects in Relation to Chlorination and the Amount of Natural organic Matter in Water Supply. *American Journal epidemiology*, [e-journal] 156(4), pp. 374-382. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf038>
- Hashmin, I., Farooq S. y Qaiser, S., 2009. Chlorination and water quality monitoring within a public drinking water supply in Rawalpindi Cantt ((wrestridge and Tech) area, Pakistan. *Environmental monitoring Assessment*, [e-journal] 158(393), pp. 393-403. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0592-z>
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trusell, R., y Tchobanoglous, G., 2017. *Principios de tratamiento del agua*. Distrito Federal: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Long, D. T., Pearson, A. L., Voice, T. C., Polanco A. G., Sanchez C. E., Xagorarakis, I., Concha F. G., Puc M., Rzotkiewicz A.T., y Lopez R., 2018. Influence of rainy season and land use on drinking water quality in a karst landscape, State of Yucatán, México. *Applied Geochemistry*, [e-journal] 98, pp.265-277. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.020>
- Manahan, S. E., 2014. *Introducción a la Química Ambiental*. Barcelona: Reverté.
- Méndez, R. I., Pacheco, J. G., Castillo, E. R., Cabrera, A., Vázquez, E., y Cabañas, D. D., 2015. Calidad microbiológica de pozos de abastecimiento de agua potable en Yucatán. *Ingeniería, Revista Académica de la facultad de ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, [e-journal] 19(1), pp.51-61. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/14>
- Mendizabal, I., Stuyfzand, P. J. y Wiersma, A. P., 2011. Hydrochemical system analysis of public supply well fields, to reveal water-quality patterns and define groundwater bodies: The Netherlands. *Hydrogeology Journal*, [e-journal] 19, pp. 83-100. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0614-0>
- Messina Baas, O., 2006. *Consecuencias de la desinfección con cloro del agua para consumo humano*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en Repositorio institucional: <<http://132.248.9.195/pd2007/0614507/0614507.pdf>> [Consultado el 30 de julio 2020]
- Moreno, M., Martínez-Salvador, C., Walid, A., Liedl, R., Stefan, C., y Pacheco, J., 2019. First Steps into an Integrated Karst Aquifer vulnerability Approach (IKAV). Intrinsic Groundwater Vulnerability Analysis of the Yucatan Karst, México. *water*, [e-journal] 11(1610). doi: <https://doi.org/10.3390/w11081610>
- Organización Mundial de la Salud 2018. *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. 4ta ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Orner, K. D., Calvo, A., Zhang, J. y Mihelcic, J. R., 2017. Effectiveness of in-line chlorination in a developing world gravity-flow water supply. *Waterlines*, [e-journal] 36(2), pp. 167-182. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.16-00016> or file:///C:/Users/fytya/Downloads/Chlorination.pdf
- Pacheco, J. G. y Cabrera, S. A., 2013. *Calidad del agua Subterránea en el estado de Yucatán después del Huracán Isidore*. Mérida(Yucatán): Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y tecnológica CONACYT-Gobierno del estado de Yucatán.
- Pacheco, J., Marin, L., Cabrera, A., Steinich, B. y Escolero, O., 2001. Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells, Yucatán, México. *Environmental Geology*, [e-journal] 40, pp.708-715. <https://doi.org/10.1007/s002540000180>
- Philipp, O., Malakar, P., Sandhu, C., Grisek, T., Kumar Sharma, S., Chandra kimothi, P., Nüske, G., Wagner, M., Goldmaier, A. y Benz, F., 2019. Combination of River Bank Filtration and Solar driven Electro Chlorination Assuring safe Drinking water Supply for River Bound Communities in India. *Water*, [e-journal] 11(1), 122, pp. 1-17. <https://doi.org/10.3390/w11010122>
- Ramírez, A. S., 2011. *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico*. 1era ed. Medellín: Ediciones de la U.
- Rand, J. L., Gagnon, G. A. y Knowles, A., 2014. Establishing minimum free chlorine residual

- concentration for microbial control in a municipal drinking water distribution system. *Water Practice & Technology*, [e-journal] 9(4), pp. 491-501. [https://doi: 10.2166/wpt.2014.055](https://doi.org/10.2166/wpt.2014.055)
- Rodriguez, E., Rosas, M. y Hernandez, L. M., 2019. Water societal metabolism in the Yucatan Peninsula. The impact of climate change on the recharge of the groundwater by 2030. *Journal of Cleaner Production*, [e-journal] 235, pp. 272-287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.310>
- Roy, D., McEvoy, j. y Khan, E., 2020. Abundance and activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria in bulk water and biofilm in water supply systems practicing chlorination and chloramination: Full and laboratory scale investigations. *Science of Total Environment*, [e-journal] 715,2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137043>
- Sawyer, C., Perry, M. y Gene, p., 2000. *Química para ingeniería ambiental*. Cuarta ed. México: Mc Graw Hill.
- Secretaría de Desarrollo Social, 2017. *Informe anual sobre la pobreza y rezago social 2017: Espita, Yucatán*. [PDF] México: Secretaría de desarrollo social. Disponible en: <http://diariooficial.gob.mx/SEDESOL/2017/Yucatan_032.pdf> [Consultado el 27 de julio de 2020]
- SSA, 1993. NOM-014-SSA1-1993. *Procedimientos Sanitarios para el muestreo de Agua, para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados*. [PDF] México: Secretaría de salud. Disponible en: <<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/014ssa13.html>>[Consultado el 16 de abril de 2020].
- SSA, 1994. NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. [PDF] México: Secretaría de salud. Disponible en: <<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>> [Consultado el 15 de abril de 2020].
- SSA, 2014. PROY NOM-250-SSA1-2014. *Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua y requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, su control y vigilancia. Procedimiento sanitario*. [PDF] México: Secretaría de salud. Disponible en: <http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356607&fecha=15/08/2014> [Consultado el 15 de abril de 2020].
- United States Environmental Protection Agency, 1983. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. [PDF] E.U.A: Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. Disponible en: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30000Q10.PDF?Dockey=30000Q10.PDF>> [Consultado el 29 de agosto de 2020].
- Weber, J., Borchardt, A., Canale, P., Cleasby, L., Cruver, E., Dick, I., Donahue, M., Charles, R. y Posselt, S., 2017. *Control de la calidad del agua procesos fisicoquímicos*. Barcelona: Editorial Reverte, S.A.
- Zhang H., Zhang, Y., Shi, Q., Hu, J., Chu, M., Yu, J., y Yang, M., 2012. Study on Transformation of Natural Organic Matter in Source Water during Chlorination and Its Chlorinated Products using Ultrahigh Resolution Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology*, [e-journal] 46(8), pp.4396-4402. <https://doi.org/10.1021/es203587q>
- Zhao L., Wang Liu, Y., Li, N., Yan, X. y Li, X., 2020. Response of bacterial regrowth, abundant and rare bacteria and potential pathogens to secondary chlorination in secondary water supply system. *Science of the Total Environment*, [e-journal] 719,137499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137499>