

Formation of trihalomethanes during the disinfection process in the potabilisation of water

Nibis Bracho¹, Javier Castillo², Luis Vargas¹ y Ricardo Morales

¹Centro de Investigación del agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. nibsbracho@hotmail.com. ²Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT-CICASI). laboratorios@inzitcicasi.gob.ve.

Abstract

The purpose of water disinfection is to selectively eliminate pathogenic microorganisms. The aim of this work is to diagnose the conventional injection system of chlorine in the Plant Alonso de Ojeda (Plant "C") of Maracaibo city to determine the bacteriological quality of both the natural and the treated water, as well as the formation of THMs during this process. To compare them with the permissible maximum levels of chloroform indicated by the W.H.O. (30 µg/L). The applied methodology consisted on making operational changes to diminish the THMs analysing: a) condition of traditional operation, which includes pre-chloration, intermediate chloration (before the filters), b) eliminating the pre-chloration, c) post-chloration, d) modifying the pre-chloration point toward the entrance of the flocculators in absence of intermediate chloration. For each case it was determined colour, turbidity, aerobic heterotrophic, total and fecal coliforms and trihalomethanes. Being obtained in the natural waters an average of 89.17 UFC/100 mL and 3.0 UFC/100 mL for the total and fecal coliforms respectively, 508.65 UFC/100mL of aerobic heterotrophic, 5 NTU and 16 Pt-Co. Chlorine injection give as result the formation of 32.43 µg/L of chloroform, when the maximum thing permissible it corresponds at 30 µg/L. The elimination of the points of injection of chlorine, in the pre-chloration and the intermediate chloration, allows the chloroform reduction from 32.43 µg/L to 10.57 µg/L fulfilling the permissible levels. On the other hand chlorine economic expenses were decreased 50%. In this evaluation it was proven that the THMs were linearly increased at each injection point. Therefore, when suppressing the pre-chloration and the intermediate chloration, 67% of THMs were eliminated.

Key words: Disinfection, chlorine, trihalomethanes, potabilisation.

Formación de trihalometanos durante el proceso de desinfección en la potabilización de agua

Resumen

La desinfección de las aguas tiene como propósito la destrucción selectiva de aquellos organismos capaces de transmitir infecciones a través del agua. La finalidad de esta investigación fue efectuar un diagnóstico de la operación tradicional del sistema de inyección de cloro en la Planta Alonso de Ojeda (Planta "C") de Maracaibo, con el propósito de determinar su necesidad en función de la calidad bacteriológica de las aguas naturales y tratadas, así como también la formación de Trihalometanos (THMs) durante el proceso de potabilización. La metodología aplicada consistió en efectuar cambios operacionales para disminuir los (THMs), analizando: a) Condición de operación tradicional, b) eliminando la pre-cloración, c) sólo pos-cloración, d) modificando el punto de pre-cloración hacia la entrada de los floculadores en ausencia de cloración intermedia. Para cada caso fue determinado color, turbiedad, heterótrofos aerobios, coliformes totales y fecales y trihalometanos. Obteniéndose en las aguas tratadas un promedio de

89.17 UFC/100 mL y 3 UFC/100 mL para los coliformes totales y fecales respectivamente, 508.65 UFC/100mL de heterótrofos aerobios, 5 NTU de turbiedad y 16 Pt-Co de unidades de color. La inyección de cloro en diversos puntos, distribuidos durante todo el proceso de potabilización, trajo como consecuencia la formación de 32.43 $\mu\text{g/L}$ de cloroformo, cuando lo máximo permisible corresponde a 30.00 $\mu\text{g/L}$. La eliminación de los puntos de inyección de cloro, en la pre-cloración y la cloración intermedia, permitió la reducción del cloroformo de 32.43 $\mu\text{g/L}$ a 10.57 $\mu\text{g/L}$ cumpliendo con los niveles permisibles exigidos por la Organización Mundial de la Salud O.M.S. Por otra parte se redujeron los gastos económicos del cloro en un 50%. En esta evaluación se comprobó que los Trihalometanos Totales (THMs) se incrementan linealmente en cada punto de inyección, por lo tanto al suprimir la pre-cloración y la cloración intermedia, fue eliminado 67% THMs.

Palabras clave: Desinfección, cloro, trihalometanos, potabilización.

Introducción

El abastecimiento de agua se considera como una inversión básica de interés general, posibilitando las actividades humanas e industriales que influyen directamente en la tasa de crecimiento económico. Para determinar la contaminación de las aguas se utilizan indicadores físicos químicos y microbiológicos que pueden ser determinados por diferentes técnicas según sea el caso, incluyendo en estos los toxicológicos [1].

Para determinar calidad de un agua, bien sea para consumo o contacto humano, se suelen utilizar principalmente indicadores microbiológicos (hongos, levaduras, protozoos, bacterias, virus) que indiquen el riesgo potencial de enfermedades infecciosas [2].

Existen diversos grupos bacterianos que son utilizados como indicadores de calidad en las aguas, entre estos grupos se encuentran las bacterias coliformes (totales y fecales), las cuales han sido a lo largo de la historia las utilizadas como indicadoras de contaminación microbiana en cuerpos de agua, indicando un riesgo potencial de presencia de organismos patógenos [3].

Para la disponibilidad de aguas de consumo, la aplicación de tratamientos y control químico se ha tornado una práctica necesaria, dada la proliferación de contaminación de los cuerpos de aguas. Entre los diferentes agentes químicos, el cloro ha demostrado bondades para los sistemas de potabilización; investigaciones en el área han reportado la formación de subproductos por la combinación de cloro con sustancias húmicas y fúlvicas comunes en el agua cruda, así como también pigmentos vegetales, algas, aminoácidos y pirimidinas, proteínas y fenoles [4, 5]. Du-

rante la cloración existe el riesgo potencial de formación de compuestos organoclorados conocidos como trihalometanos (cloroformo, bromoformo, etc), que viene dado por una dependencia lineal de primer orden entre las fracciones orgánicas existentes y el cloro inyectado [6]. Este riesgo potencial de formación de THMs se ve afectado por los cambios de temperatura, pH, la fuente y la concentración del precursor, la dosis de cloro y los niveles de yoduro y bromuro, así como el tiempo de reacción [7].

Puesto que el cloroformo ha sido identificado como compuesto carcinógeno (en estudios con roedores) existe cierta preocupación, y se están realizando en la actualidad muchas investigaciones sobre el problema [8].

El resultado de numerosas investigaciones y ensayos, enfocados a evidenciar o demostrar la genotoxicidad del cloroformo han sido positivas; sin embargo, la veracidad de estos resultados está en discusión ya que no se ha tomado en cuenta el agua potable como vehículo portador de la sustancia [7, 9]. Existen otros riesgos a la salud, actualmente en estudios, tales como la potencialidad de incrementar los defectos cardíacos con el incremento de los THMs [10]. Todos estos riesgos a la salud se incrementan con el aumento de las concentraciones de bromo contenido en el agua natural [11, 12].

Dado los riesgos planteados, hoy en día tanto en EEUU como en Europa recomiendan la utilización de otras alternativas de desinfección tales como: el cloruro de amonio, el cual es una combinación de cloro y amoníaco. Este compuesto es más estable que el cloro y ofrece algunos beneficios a la salud. El cloruro de amonio tiene un mayor efecto residual en el agua para dar más

protección contra agentes patógenos tales como bacterias y virus, con respecto al cloro, y produce niveles menores de subproductos de la desinfección tales como los trihalometanos (THM) [13]. Igualmente, existen una diversidad de compuestos con características desinfectantes, dentro las cuales se puede mencionar: el dióxido de cloro, las cloroaminas, el ozono, el permanganato de potasio, yodo, bromo, derivados férricos, plata coloidal, peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta.

De todos los tratamientos anteriormente mencionados, el permanganato de potasio y la luz ultravioleta se emplean en una extensión limitada, mientras que yodo y el bromo raramente son usados por sus costos, y el resto de los compuestos ni siquiera están bien establecidos en los mercados [9]. La aplicación de cualquiera de estas alternativas de desinfección dependerá de estudios técnicos económicos [7].

Los THMs además de formarse en el proceso de tratamiento de agua pueden continuar desarrollándose en el sistema de distribución del agua potable, donde debido a las bajas velocidades y los grandes volúmenes manejados incrementan el tiempo de residencia y contacto entre la materia orgánica que pudo quedar después del tratamiento y el cloro residual [9].

Estudios realizados en Grecia demostraron que la formación de trihalometanos también está regida por las condiciones climatológicas de la zona, puesto que en épocas de verano o sequía existe menor arrastre de materia orgánica, arena, restos de vegetación, etc., incrementando el riesgo de formación de TTHMs [12].

Diferentes investigadores han propuesto como medida de eliminación de los compuestos orgánicos, precursores de la formación de THMs, reemplazar el cloro libre como agente primario de desinfección por las cloroaminas, dióxido de cloro o combinación de estos y remover los THMs formados mediante tratamiento químico o por absorción con carbón activado [7].

Por todo lo anteriormente planteado y dada la importancia que tiene el proceso de desinfección, durante el tratamiento de potabilización de las aguas, se presenta este estudio, cuyo objetivo fue la evaluación de diferentes condiciones operacionales en el proceso de desinfección, variando los puntos de dosificación de cloro en las dife-

rentes unidades de la planta, y así evaluar la eficiencia del proceso con la menor formación de trihalometanos al final del proceso de potabilización. Este estudio se desarrolló en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Alonso de Ojeda, Maracaibo-Venezuela, llamada también Planta "C". En el desarrollo de la evaluación se utilizaron dos indicadores, uno microbiológico (coliformes y heterótrofos aerobios) y el otro químico (elementos organoclorados).

Procedimiento Experimental

Los estudios se realizaron en la Planta de Potabilización Alonso de Ojeda descrita en la Figura 1.

Metodología de campo

Los muestreos para los análisis de los indicadores se realizaron durante seis (6) semanas. Se evaluaron cuatro condiciones diferentes con respecto a los puntos de dosificación de cloro: a) en las tres primeras semanas de muestreo donde la dosificación de cloro se efectuó en todos los puntos convencionales tradicionalmente utilizados en la planta sin efectuar limpieza en ninguna de las unidades (Pre-clorando a la entrada, cloración intermedia con los canales sucios y pos-clorando), captándose muestras en cada punto para determinar indicadores bacteriológicos y químicos (cloro y THMs). b) A partir de la cuarta semana, se eliminó el cloro en el tanque de pre-cloración y se tomaron las muestras en el agua cruda, a la entrada de los canales y en la post-cloración. c) La quinta semana, se eliminó la dosificación de cloro en la pre-cloración y en la cloración intermedia durante la noche. d) La última semana de muestreo se modificó la dosificación de cloro a la entrada colocándose el punto de pre-cloración antes de los floculadores y se eliminó la cloración en los canales, los cuales se encontraban limpios.

Los indicadores microbiológicos utilizados fueron bacterias coliformes totales y fecales, y bacterias aerobias heterótrofas. Los indicadores físicos fueron color y turbiedad y los químicos: cloroformo, bromoformo, clorodibromometano y bromodiclorometano (Trihalometanos). La metodología para la determinación de bacteriana está dada en el SMWW [14]. El color y la turbiedad se

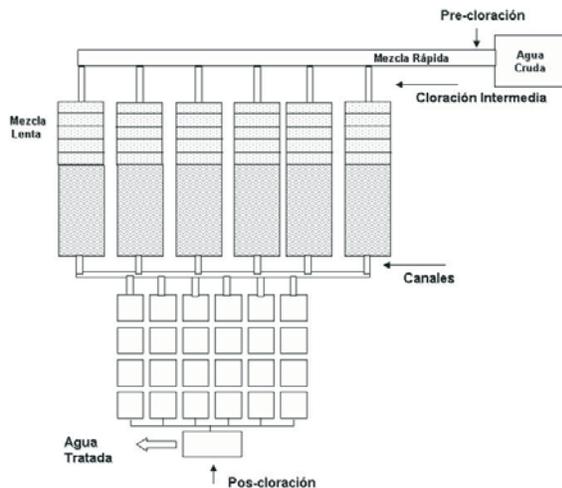


Figura 1. Esquema del Sistema de desinfección de la Planta de Tratamiento Alonso de Ojeda de Maracaibo (Planta "C").

determinaron en el Hatch 2000, mientras que la medición de Trihalometanos se realizó con el equipo HP 5890 utilizando la técnica de extracción líquido-líquido con Cromatografía de Gases empleando temperatura programable y un detector de captura de electrones.

Resultados y Discusión

Diagnóstico

El análisis de los indicadores microbiológicos de la calidad del agua cruda procedente de Tulé dio como resultado, una baja densidad de coliformes, con un promedio ponderado mensual de 89,17 UFC/100 mL para los coliformes totales y 3 UFC/100 mL para los coliformes fecales. Según las normas nacionales establecidas de acuerdo a la Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.021, estas aguas son clasificadas como Tipo 1, y a su vez las subdividen en 1A y 1B, las cuales deben tener un promedio mensual de coliformes menor a 2.000 NMP/100 mL para el primer sub-tipo y menor de 10.000 NMP/100 mL para el segundo.

En los Canales antes de la cloración intermedia resultó entre 0 y 113 UFC/100 mL de coliformes totales y con ausencia de coliformes fecales. La densidad de coliformes totales aumentó durante el período de lluvias, ya que esta genera arrastres de todos los cuerpos sólidos y materias

orgánicas que facilitan la proliferación bacteriana. Después de la cloración intermedia y post-cloración no se observó la presencia de coliformes ni totales, ni fecales.

Las bacterias aerobias heterótrofas a la entrada y a la salida de la planta resultaron en promedio 508,65 UFC/mL y 1,75 UFC/mL, respectivamente. Por lo que se puede decir que el proceso de desinfección es técnicamente eficiente en cuanto a remoción de microorganismos.

Por otra parte se observó, que al dejar de clorar en la post-cloración ocurre un aumento en la densidad bacteriana que sobrepasa los límites establecidos para la cantidad de heterótrofos aerobios, sin embargo, no se detectó la presencia de coliformes en estos casos.

Las aguas naturales procedentes de Tulé poseen una excelente calidad física, química y bacteriológica; su característica de entrada de 5 NTU de turbidez y 16 unidades de color platino cobalto son indicativas de la presencia de poca materia orgánica puesto que el color es originado por la descomposición de la materia orgánica. Estos antecedentes permiten efectuar una reflexión y revisión sobre el proceso tradicional de la inyección de cloro en Planta "C".

La inyección de cloro en la entrada a la planta de tratamiento se hace para eliminar la formación de algas en el tanque de recepción, acarreado esto un efecto secundario que es el riesgo potencial de formación de trihalometanos.

El diagnóstico de la pre-cloración se repite para los canales que conducen el agua desde los sedimentadores hasta los filtros. La ausencia de indicadores de contaminación bacteriológica no justifica el empleo de hasta 1,5 mg/L de cloro, sin embargo, se aplica esta dosis para garantizar la presencia de cloro en los puntos más alejados de la red de distribución.

Por otra parte no existen medidores de flujo en sitio que puedan cuantificar la dosis y se carece de válvulas individuales que permiten cerrar el cloro para cada canal.

Dosificación tradicional de cloro

Los valores de THMs totales en la entrada resultaron bajos (11,38 µg/L). La concentración aumenta a 38,59 µg/L después de la cloración intermedia, existiendo después de la post-cloración

una concentración significativa hasta de 52,70 µg/L de los cuales 32,43 µg/L corresponden al cloroformo (Figura 2). Las Normas Nacionales señalan como límite máximo permisible 30 µg/L de cloroformo. La formación de los THMs continúa su proceso a través de la red de distribución pudiendo llegar al consumidor una concentración que pueda afectar la salud del mismo y generar riesgos de cáncer y efectos adversos en la salud.

En el momento de la captación se observaron depósitos de algas en las paredes y el fondo de los canales que conducen el agua hasta los filtros. Esta materia orgánica reacciona con el cloro aplicado en la cloración intermedia por lo cual se limpió el canal 4 y 5, monitoreándose bajo la condición tradicional de funcionamiento de la planta. Posterior al día de la limpieza se tomó muestra en el canal 4, no detectándose formación de THMs, mientras que en los canales sucios (2 y 6) se observaron 23 y 27 µg/L de cloroformo como compuesto de mayor concentración, respectivamente. Estos resultados indican que la formación de THMs puede controlarse si se mantiene

una limpieza adecuada de todos los canales de distribución de agua de la planta.

Dosificación intermedia de cloro y pos-cloración

Se eliminó la pre-cloración nocturna y se limpiaron todos los canales, con la finalidad de evaluar la formación de THMs resultando una disminución del cloroformo de 32,43 a 11,29 µg/L, lo cual representa una reducción del 65% (Figura 3), ofreciendo una calidad de agua dentro de los niveles permisibles por las normativas nacionales.

Dosificación de cloro sólo en la pos-cloración

Se eliminó la inyección cloro durante la noche tanto en la pre-cloración como en la cloración intermedia, observándose cambios favorables en la formación de THMs en los canales y detentándose una concentración de 10.57 µg/L de cloroformo a la salida (Figura 4). Aun cuando los THMs a la salida son similares a la obtenida eli-

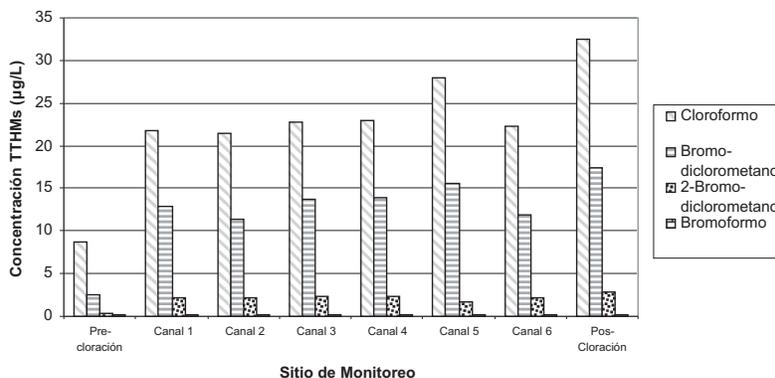


Figura 2. Concentraciones de THMs empleando la dosificación tradicional de cloro.

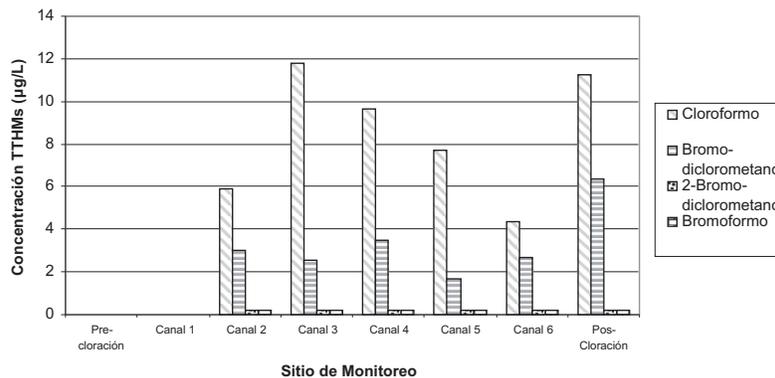


Figura 3. Concentraciones de THMs eliminando la pre-cloración.

minando la pre-cloración el ahorro de cloro representaría 67% del cloro total.

Modificación del punto de pre-cloración hacia la entrada de los floculadores

Se analizó la condición de pre-cloración a la entrada de los floculadores, eliminando la cloración intermedia y, permaneciendo la post-cloración. Para esta condición se encontró una concentración de THMs a la salida de 8,89 µg/L de

cloroformo a la entrada de los floculadotes y 15.99 µg/L de cloroformo a la salida de la planta (Figura 5).

Se encontró la menor formación de THMs cuando sólo se post-clora, considerándose la condición tradicional de operación de la planta, la más desfavorable (Figura 6), puesto que el cloroformo sobrepasa los límites permisibles.

La aplicación de cloro en distintos puntos de la planta no está justificada ni bacteriológica-

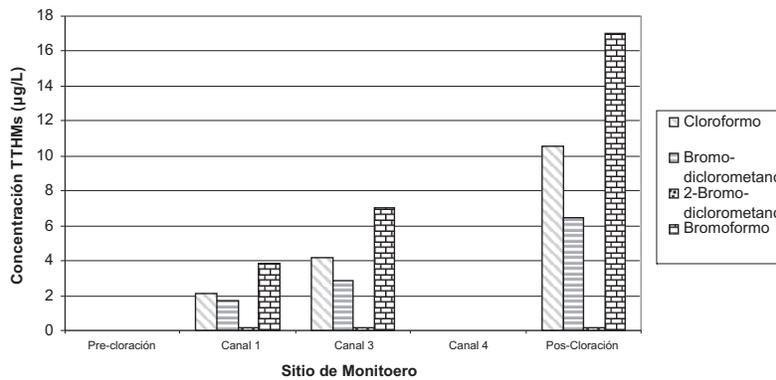


Figura 4. Concentraciones de TTHMs empleando solamente pos-cloración.

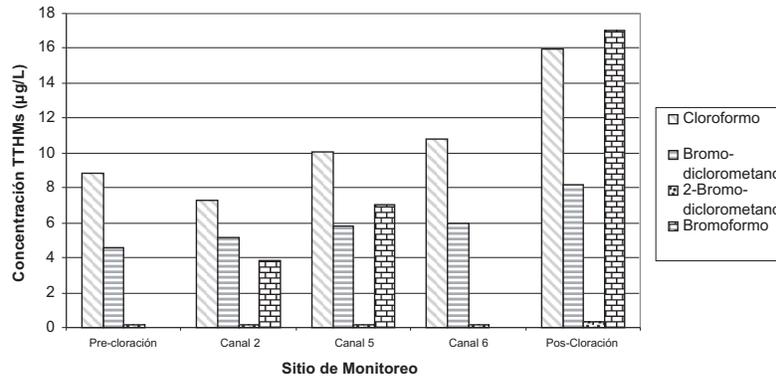


Figura 5. Concentraciones de TTHMs empleando pre-cloración a la entrada de los floculadores.

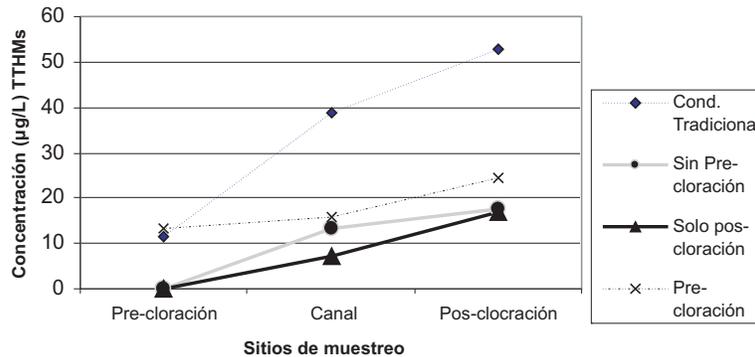


Figura 6. Comportamiento de los TTHMs con cada sistema de inyección de cloro.

mente ni químicamente. Una Optimización en la aplicación del cloro podría llevar a una disminución de inversión de productos químicos (cloro) para desinfección del 50%, logrando reducir la formación de trihalometanos desde 52,69 $\mu\text{g/L}$ hasta 17,30 $\mu\text{g/L}$, donde el riesgo potencial es la formación de cloroformo, cuya concentración 32,43 $\mu\text{g/L}$ es superior a lo permisible por las normas nacionales de 30,00 $\mu\text{g/L}$, bajo la condición de funcionamiento tradicional de la planta. Este parámetro disminuye hasta 10,57 $\mu\text{g/L}$ eliminando la cloración nocturna en la pre-cloración y cloración intermedia.

Conclusiones

Los promedios ponderados de los indicadores bacterianos evaluados en el agua cruda procedente de Tulé son bajos con respecto a la normativa vigente, aunados a las características físicas y químicas de la misma demuestran la excelente calidad físico-química y bacteriológica del agua de entrada a la planta, no requiriéndose un proceso drástico de desinfección, por lo que no se justifica la aplicación de cloro en varios puntos de la planta, sino solamente a la salida de la misma.

El uso excesivo de cloro contribuye a la formación de elementos organoclorados denominados trihalometanos (THMs), por lo cual es necesario mejorar el proceso de desinfección de las plantas de potabilización y el mantenimiento de los procesos unitarios, a fin de evitar la reacción del cloro con la materia orgánica presente.

Referencias Bibliográficas

- Hernández de Pool, D.: "Contaminación Ambiental, causas efectos y control". (1990).
- Sociedad Venezolana de Microbiología (SVM). "Calidad Microbiológica del Agua. 2001".
- Apha.: "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", 19 th, 1998.
- Darner A., Mora A.: "Cáncer Gástrico en costa rica: ¿existe o no relación con la cloración del agua para consumo humano?". XXX Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2000)
- Kim J., Cheng Y., Shin D., Kim M., Lee Y., Lim Y., Lee D. "Chlorination by-products in surface water treatment process". Desalination, Vol. 151, issue 1, (2003). Pages 1-9.
- Panyapinyopol B., Marhaba T., Kanokkanta-pong V., Pavasant P.: "Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water". Journal of Hazardous Materials. Vol.120, issues 1-3, (2005). Pages 229-236.
- Romero J.: "Calidad de Agua". 2da edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Pág. 269-299. Colombia julio 2005.
- CEPIS.: "Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Manual III: Teoría. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente". (1992).
- A.W.W.A. "Calidad y Tratamiento de Agua: Manual de suministro de agua comunitaria". American Water Works Association. Editorial Mc Graw Hill Professional. 5ta Edición, pág. 917-965. España (2002).
- Cedergren M., Selbing A., Löfman O., Källen B.: "Chlorination Byproducts and Nitrate in Drinking Water and Risk for Congenital Cardiac Defects". Environmental Research, Vol. 89, issue 2, (2002). Pages 124-130.
- Myllykangas T., Nissinen T., Mäki-Paakkanen J., Hirvonen A., Vartiainen T. "Bromide affecting drinking water mutagenicity". Chemosphere, Vol. 53, Issue 7, (2003). Pages 745-756.
- Spyros G.: "The occurrence of trihalomethanes in the drinking water in Greece". Department of Environmental Studies, University of the Aegean, Karadoni 17, Mytilene 81100, Greece. Received 3 November 1999; accepted 4 February 2000.; Available online 7 August 2000.
- El-Shafy M., Grünwald A. "THM formation in water supply in South Bohemia, Czech republic". Water Research, Vol. 34, issue 13, (2000). Pages 3453-3459.
- Standard Methods for de Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. (1998).

Recibido el 15 de Enero de 2009

En forma revisada el 5 de Octubre de 2009