

Contaminación bacteriológica en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control

Cristina De Sousa*, María Cristina Colmenares & Angelina Correia

La presente investigación tuvo como propósito un análisis de las estrategias para el control de la contaminación bacteriológica, basado en los factores que afectan el deterioro de los sistemas de distribución de agua potable, así como su influencia sobre la calidad del agua suministrada al consumidor. El sistema de distribución es de vital importancia para establecer la calidad final del agua, siendo las biopelículas que se forman en las paredes de las tuberías la causa de su deterioro. La agrupación de los diferentes microorganismos en colonias se considera como un mecanismo de defensa; estos se benefician de los nutrientes y se hacen fuertes frente a los desinfectantes. Se concluye y se recomienda que como estrategias para controlar la contaminación bacteriológica se debe establecer un programa de mantenimiento en todo el sistema e incluso en los tanques de almacenamiento. También es necesario el control de la corrosión y de los niveles de nutrientes y realizar prácticas apropiadas de desinfección; estas medidas deben ser aplicadas por un personal capacitado, el cual debe mantenerse en constante entrenamiento.

Palabras clave: Red de distribución, agua potable, contaminación bacteriológica.

INTRODUCCIÓN

La presencia de microorganismos en el agua potable y la formación de biopelículas en los sistemas de distribución produce la contaminación bacteriológica. Las biopelículas se forman en las tuberías de los sistemas de distribución cuando las células microbianas se adhieren a las superficies de las tuberías y se multiplican para formar una capa de limo, las cuales son microambientes dinámicos, con procesos tales como metabolismo, crecimiento y formación de productos. La tasa de formación de las biopelículas dependen de las propiedades fisicoquímicas de la interfase, rugosidad de la superficie y los factores fisiológicos de los microorganismos fijados, como: bacterias heterotróficas (coliformes totales y fecales), oportunistas, resistentes a los antibióticos y a los desinfectantes, pigmentadas, hongos, protozoarios y otros invertebrados. (USEPA, 1992).

El crecimiento bacteriano en los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable produce un deterioro del índice de calidad del agua (ICA), modificando su sabor y olor aumentando su turbidez e incluso llegando a afectar su conformidad con las normas microbiológicas de calidad. Además, la película bacteriana formada en las paredes de las tuberías puede reducir la capacidad hidráulica de las mismas, acelerar su corrosión y hacer más difícil el mantenimiento de una concentración residual de desinfectante (Knobelsdorf & Mujeriego, 1997).

Estudios realizados utilizando microscopía electrónica de las tuberías de un sistema de distribución de agua mostraron comunidades complejas de microorganismos. Los investigadores concluyeron que aún cuando las bacterias se desactivan en la planta de tratamiento, algunas células logran sobrevivir y adaptarse a la red de distribución (Allen *et al.*, 1979; Tuovinen *et al.*, 1980; Ridgway & Olson, 1981). Es importante resaltar que el crecimiento de las bacterias en las paredes de las tuberías también puede considerarse como un hábitat para las bacterias potencialmente patógenas (Van der Kooij, 1992).

Universidad de Carabobo. Valencia, Edo Carabobo. Venezuela.

*Autor de correspondencia: cristydsousa@hotmail.com

La presencia de bacterias coliformes en el agua potable representa una amenaza potencial a la salud pública, y esto podría indicar que la desinfección no fue suficiente para eliminar todos los organismos patógenos asociados con los desperdicios de origen humano y animal. La permanencia y posible crecimiento de microorganismos en las tuberías de la red son influenciadas por una variedad de condiciones ambientales, que incluyen las características físicas y químicas del agua, tiempo de operación del sistema, material de la red y la disponibilidad de los sitios aptos para la colonización, los cuales con frecuencia están localizados en secciones de flujo lento, porciones de tubería con agua estancada y áreas de tuberías con actividad corrosiva (USEPA, 1992).

Por lo anteriormente expuesto, es importante conocer cuáles son los factores que afectan el deterioro físico de los sistemas de distribución de agua potable, así como, su influencia sobre la calidad del agua suministrada al consumidor, a fin de poder realizar un mejor control de la estabilidad del agua y del crecimiento de microorganismos en la red, y garantizar que el consumidor obtenga un agua de alta calidad, de acuerdo, a la “Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento” (Gaceta Oficial N° 5.568, 2001) y a las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable” (Gaceta Oficial N° 36.395, 1998), a fin de reducir posibles daños a la salud pública.

Es importante señalar que la Constitución Bolivariana de Venezuela (Gaceta Oficial N° 5.453, 2000), en su Artículo 83, establece que la salud es un derecho social fundamental, obligatorio del Estado, que lo garantizará como parte del derecho a la vida; y en el Artículo 84, se garantiza el derecho a la salud y la prevención de enfermedades, garantizando tratamiento oportuno y de calidad. También cabe mencionar que el Artículo 6 de la “Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento” (Gaceta Oficial N° 5.568, 2001), garantiza la entrega de agua a los usuarios mediante la utilización de tuberías de agua apta para el consumo humano, incluyendo su conexión y medición, así como los procesos de captación, conducción, almacenamiento y potabilización. Igualmente, las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable” (Gaceta Oficial N° 36.395, 1998), en el Capítulo II “De los Aspectos Microbiológicos” y en el Capítulo III “De los Aspectos Organolépticos, Físicos y

Químicos” indican los valores máximos aceptados bajo los cuales deben mantenerse los parámetros de calidad para que el agua se encuentre apta para el consumo humano.

ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN BACTERIOLÓGICA

Después de determinar que existe un problema de biopelículas, el personal responsable del mantenimiento de la red de distribución no debe suponer que todas las coliformes son debido a las biopelículas. Las coliformes en el agua podrían indicar una deficiencia importante en el mantenimiento del sistema de distribución o del tratamiento, y por lo tanto, una amenaza potencial a la salud pública. Si las muestras de agua potable son positivas para coliformes totales, particularmente si el sistema no ha tenido problemas en el pasado, se debería investigar la posibilidad de una ruptura en las tuberías o de conexiones cruzadas. El conocimiento de los factores que contribuyen al crecimiento de las biopelículas ofrece a las empresas abastecedoras de agua potable una ventaja para asegurar que el crecimiento bacteriano esté limitado en el sistema de distribución. La compañía abastecedora puede considerar el establecimiento de un plan para el control de las biopelículas de coliformes antes de que se verifiquen las pruebas positivas (USEPA, 1992). A continuación se describen las estrategias o medidas que deben incluirse en un plan para prevenir y controlar las biopelículas.

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Enjuague, Limpieza y Desinfección de los Sistemas de Distribución

Un programa de mantenimiento es vital para controlar y prevenir el crecimiento de las biopelículas. El enjuague regular ayuda a distribuir el desinfectante residual por todo el sistema y arrastrar las biopelículas existentes. El enjuague y la limpieza mecánica en las líneas del sistema de distribución pueden ser procedimientos preventivos efectivos, pero podrían no ser suficientes para resolver el crecimiento biológico una vez que el problema ha llegado a ser severo (USEPA, 1992).

Muñoz (2001), de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, resalta que el Método Hidráulico o “Flushing” se utiliza en la limpieza de

las redes de distribución, el cual se realiza dentro de la red con el fin de desprender o controlar la biopelícula, evitando así su desarrollo y adherencia a las superficies de la tubería por medio de la fricción entre el agua y las paredes. Para la realización de este método es preciso conocer el estado y las características de la red de distribución con el fin de determinar las condiciones óptimas de lavado como: velocidades, frecuencia y duración, y de esta manera potenciar la efectividad del método, el cual consta de dos tipos: a) Lavado Convencional, donde se abren las válvulas e hidrantes de un determinado sector sin seguir ningún orden específico. El porcentaje de remoción que se puede alcanzar es bajo, y debido a que no es un proceso esquemático se pueden presentar retornos de flujo a zonas ya lavadas. b) Lavado Unidireccional, el cual sigue un orden con rutas y sectores establecidos. De acuerdo con las velocidades determinadas para el arrastre de sedimentos se hacen los lavados. Para la realización del lavado se operan las válvulas e hidrantes de manera secuencial, de tal modo que el lavado comience en la planta de tratamiento o en un lugar cercano y se empieza a recorrer la red de manera ordenada. El recorrido se hace desde los diámetros mayores hacia los diámetros menores y desde las zonas limpias hacia las sucias para ir evacuando el agua no potable, evitando que ésta se devuelva. Se emplea una velocidad aproximada de 1,8 m/s, para remover la biopelícula, los sedimentos y los tubérculos presentes en la red.

Carvajal *et al.* (2006), también señalan que el Lavado Hidráulico (LH) y el Lavado Hidráulico Unidireccional (LHU) son técnicas disponibles para mejorar la calidad del agua y la capacidad hidráulica del sistema de distribución, quitando la arena, los sedimentos, y la biopelícula de las paredes de la tubería. Las ventajas del LHU con respecto al LH son: se puede llegar a ahorrar hasta un 40% de agua y se estandarizan procedimientos para comparar con LHU futuros. El Lavado Hidráulico y en especial el Unidireccional ha mostrado gran ventaja desde el punto de económico y de implementación en campo. La eficacia del LH es inversamente proporcional a la longitud de la tubería, mientras más corta sea ésta las pérdidas de presión son menores, mejorando el resultado del lavado. La duración del LH es variable y particular para cada caso, este termina cuando se alcanzan los parámetros de calidad del agua deseados; además presenta buenos resultados si se realizan periódicamente.

Reyes del Toro & Saldarriaga (2005), destacan que la velocidad del crecimiento y regeneración de las biopelículas es directamente proporcional al diámetro de las tuberías; entre mayor sea el diámetro es menor el esfuerzo cortante y, por lo tanto, las bacterias pueden adherirse con mayor facilidad a la pared interna de la tubería. Luego de un desprendimiento de biopelículas, debido a lavados, la biopelícula continua aumentando su espesor pero no alcanza nuevamente la cantidad de biomasa acumulada antes de dicho evento. La eficiencia de los lavados y el control de las biopelículas a través de lavados sucesivos, demuestran que el lavado con agua a presión es una herramienta efectiva para realizar un mantenimiento rutinario de las redes de distribución.

En otro orden de ideas, cabe destacar que, la American Water Works Association (AWWA, 2002) señala, que cuando se reemplazan secciones viejas en un sistema de distribución, se debe usar el siguiente procedimiento estándar:

- Escoger materiales para unir las tuberías que no sean porosos y usar lubricantes no nutritivos.
- Mantener las nuevas secciones de tuberías, accesorios y válvulas cubiertas mientras estén almacenados para protegerlos de la contaminación de la tierra, escurrimiento y fugas de líneas de agua o cloacas.
- Antes de usar nuevos materiales: Enjuagar todas las tuberías con agua limpia para remover los desechos y tierra visibles. Llenar las tuberías con agua que contenga 50mg/L de cloro libre y dejarla entre 24 a 48 horas. Los niveles de cloro no deben ser menores de 25mg/L durante el período de espera. Realizar las pruebas para coliformes totales y bacterias heterótrofas. Repetir la desinfección hasta que no se detecten las coliformes y que las bacterias determinadas por el método de Conteo de Placas Heterótrofas (CPH) estén por debajo de 500/ml.

Eliminación de Áreas con Bajo Flujo y con Agua Estancada.

La eliminación de áreas con bajo flujo y porciones de tuberías con agua estancada puede mejorar la hidráulica del sistema de distribución, reduciendo de esta manera, la supervivencia de los microbios y formación de biopelículas. Las zonas de estancamiento pueden ser eliminadas empleando válvulas, mientras que las áreas de bajo flujo pueden ser eliminadas recalculando el diámetro y longitud de la tubería. En los sistemas de distribución debe evitarse los aumentos de flujo imprevistos o

disturbios hidráulicos, ya que éstos pueden hacer que las biopelículas acumuladas se desprendan. Se recomienda una presión positiva continua por todo el sistema de distribución (USEPA, 2002a).

Eliminación de las Conexiones Cruzadas y Prevención de Reflujo.

La USEPA (2002b) indica que el reflujo en los sistemas de distribución de agua pública puede ser prevenido eliminando las conexiones cruzadas o protegiendo los suministros de agua potable usando dispositivos y montajes de prevención de reflujo. Como puede suceder con cualquier dispositivo mecánico, los equipos de reflujo pueden deteriorarse y fallar con el tiempo. Los intervalos para realizar las pruebas son anual, semi-anual o basados en el riesgo. Es importante señalar que el mantenimiento de una presión estable y positiva reduce el reflujo. Minimizando los picos de presión a través del uso de bombas de velocidad variable y los procedimientos adecuados de abertura y cierre de válvulas podría reducirse la frecuencia de rupturas en las tuberías principales y de este modo operar preventivamente.

Las acciones correctivas que se deben realizar luego de detectar un incidente (en áreas con bajo flujo, agua estancada y conexiones cruzadas) son: el aislamiento o separación del área contaminada (inutilización temporal del área); notificación pública, si la contaminación ha ocurrido y no pudo ser aislada antes de llegar a los consumidores; enjuague o limpieza del sistema y reemplazo de la línea de tubería, cuando los contaminantes no puedan ser removidos por una limpieza física.

MANTENIMIENTO DE LOS DEPÓSITOS

Para reducir la presencia de patógenos y el desarrollo de biopelículas, las compañías de abastecimiento deben tener un programa planificado para rehabilitar todas las instalaciones de almacenaje de agua. Los tanques de almacenaje y las columnas de regulación deben enjuagarse a presión o limpiarse con vapor, y luego ser desinfectados antes de retornar al servicio, preferiblemente con una solución desinfectante. Las operaciones físicas y procesos químicos apropiados a los tanques de almacenaje también reducen los tiempos de residencia excesivos, los cuales pueden llevar a la supervivencia y crecimiento microbiano y formación de biopelículas. El reemplazo apropiado del agua

en las instalaciones de almacenaje de agua potable elimina las porciones de tubería con agua estancada y puede reducir el desarrollo de las biopelículas, minimizar la disponibilidad de nutrientes y prevenir la acumulación de sedimentos. Para lograr esto las compañías suplidoras de agua realizan instalaciones de válvulas en los sistemas de distribución para reducir el estancamiento y eliminar el almacenaje en exceso (USEPA, 2002a).

CONTROL DE LA CORROSIÓN

Limitando cualquier tipo de corrosión en las tuberías de los sistemas de distribución también se limita el crecimiento de las biopelículas al reducir los números de sitios disponibles para la adherencia de los microorganismos (Le Chevallier *et al.*, 1987). La corrosión se puede monitorear por métodos directos e indirectos. Los métodos directos incluyen: Inspección Física, la observación microscópica y microscópica en el interior de las tuberías proporciona un diagnóstico del grado de la corrosión; Pruebas de Inmersión en el Laboratorio, útil para realizar una evaluación inicial de la eficiencia de los inhibidores; Análisis Químico, indica información sobre el tipo o causa de la corrosión. El monitoreo indirecto podría extraer información de los Reclamos de los Clientes, en cuanto a las características organolépticas del agua; así como también de los Índices de Corrosión, tales como el Índice de Langelier y el Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio, que determinan la estabilidad del agua y la formación de una capa protectora sobre las superficies metálicas de las tuberías, mientras que, el Índice de Ryznar, Corrosión por Riddick y Relación Larson, miden el potencial corrosivo del agua; o de los análisis de las muestras de agua de varios puntos en los sistemas de distribución. Debido a que la corrosión puede ser muy lenta, los métodos de monitoreo indirecto requieren una base de datos acumulada en un largo periodo de tiempo (Letterman, 2001).

Cabe destacar que Mora & Cedeño (2005) realizaron un estudio sobre calidad y corrosión en aguas de las plantas de tratamiento Angostura y Guri del estado Bolívar, donde evidenciaron que las aguas provenientes de los ríos Orinoco y Caroní son corrosivas, lo cual fue comprobado de acuerdo a los valores de los Índices de Langelier & Ryznar para las aguas cruda y tratada en ambas plantas. Conforme a este estudio, se puede inferir que valores bajos de pH y de carbonato en el agua impiden la formación

de incrustaciones protectoras presentándose una tendencia corrosiva (picaduras) en los materiales metálicos. Los valores de las tasas de corrosión para las aguas de la red de ambas plantas pueden relacionarse con los cambios fisicoquímicos y bacteriológicos en los estanques elevados de almacenamiento y redistribución con escaso mantenimiento, la selección del material inadecuado para tuberías y/o la combinación erróneas de materiales, produciendo corrosión en la red.

Se ha demostrado que las medidas para el control de la corrosión tales como el uso de inhibidores químicos (ortofosfatos, polifosfatos y silicatos) y los ajustes de pH aumentan la eficiencia del cloro libre para la desinfección de las biopelículas en las tuberías de hierro. Cabe señalar que la aplicación de polifosfato, ortofosfato de zinc y los ajustes de la alcalinidad y del pH arrojó como resultado un mejoramiento (de 10 a 100 veces) en la desinfección de las biopelículas con el uso de cloro libre. Sin embargo, existe cierto riesgo, ya que las biopelículas simplemente podrían desprenderse y causar la existencia de coliformes si las dosis o tipo de químicos para el control de la corrosión se aplican inapropiadamente. Cuando los químicos para controlar la corrosión se aplican por periodos cortos de tiempo, los efectos no son observados de inmediato. Si la aplicación es continua, se eliminan los medios microbianos y el sistema es capaz de mantener los residuales desinfectantes más fácilmente (USEPA, 1992).

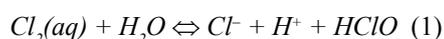
Es importante mencionar que Ríos *et al.* (2008), diseñaron un sistema piloto de distribución para el estudio de la corrosión de las tuberías, destacándose que estos sistemas tienen varias características que permiten su utilización en los estudios actuales y son los reactores más comúnmente usados para estudios de corrosión. Entre sus ventajas se tienen: las variables que afectan la corrosión pueden ser sistemáticamente controladas y evaluadas; suministran datos acerca de la velocidad de corrosión del material, efectos de fluctuaciones o modificaciones de calidad del agua o tratamientos alternativos. Las variables del sistema piloto se clasifican en tres grupos: las características físicas (material, diámetro y longitud de la sección del ensayo), las hidrodinámicas (configuración de flujo, tiempo de retención, velocidad de flujo y tiempo de estancación) y las técnicas que aseguren la calidad (medición de la calidad del agua y duración de estudio). En los sistemas pilotos de distribución

es importante tener como base los objetivos del estudio para la definición de las variables antes mencionadas.

PRÁCTICAS APROPIADAS DE DESINFECCIÓN

Se debe evaluar cuidadosamente el desinfectante seleccionado para el control de las bacterias que se encuentran en las superficies de las tuberías del sistema. El problema requiere un desinfectante capaz de penetrar la biopelícula e inactivar el ataque de los microorganismos, también debe ser relativamente estable para poder persistir en el sistema de distribución, debe ser puro y no producir productos secundarios peligrosos. Por último, podría necesitarse una alternativa más estable que el residual de cloro libre (por ejemplo, cloroaminas) para ayudar al control del crecimiento bacterial (Le Chevallier *et al.*, 1988b).

Es importante mencionar que el cloro gaseoso disuelto reacciona con el agua para formar ácido hipocloroso, iones cloruro y protones, como se indica en la reacción 1. El ácido hipocloroso es un ácido débil y se ioniza para formar ion hipoclorito (reacción 2). La suma de las tres especies químicas Cl_2 , $HClO$ y ClO^- , se refieren comúnmente como cloro libre y su concentración se expresa en unidades mg/L como Cl_2 .

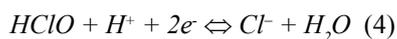
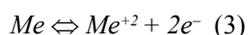


Las cantidades relativas de ácido hipocloroso e ion hipoclorito formado dependen del pH. Por ejemplo, a pH 6 una solución de cloro es aproximadamente 95 % $HClO$, a pH 8 baja a 20 % y cuando el valor del pH es de 7,5 las concentraciones se igualan (Sawyer *et al.*, 2001).

La práctica en los sistemas de distribución que experimentan problemas de recrecimiento de coliformes es mantener altos residuales de cloro libre en todo el sistema para controlar la existencia bacteriana. En general, fue necesario el uso de residuales de cloro libre de 3,0 a 6,0 mg/L para controlar el recrecimiento de coliformes. No obstante, se reportó la recuperación de 51 bacterias coliformes/100ml en muestras que contienen entre 10 y 12 mg/L de cloro libre. Si los residuales más altos no son eficientes;

o si los residuales efectivos no se pueden mantener por todo el sistema de distribución, el servicio debe considerar el uso de un desinfectante alternativo. Algunas compañías de la industria del agua han notado que aplicando un segundo desinfectante tal como un residual de cloro combinado justo antes de que el agua entre al sistema de distribución puede controlar efectivamente los niveles de las bacterias en el sistema. Aunque no hay desinfectante perfecto, recientes investigaciones han sugerido que la monocloroamina puede ser mas efectiva para el control de las biopelículas que el cloro libre. Los resultados de estudios mas recientes sugirieron que se puede lograr el control de las biopelículas usando cloroamina en el rango de 2,0 a 4,0 mg/L (USEPA, 1992). Le Chevallier *et al.* (1990b) indicaron que fue necesario un residual de monocloroamina de 2,0 mg/L para inactivar el ataque de las bacterias. En la práctica la concentración mínima variará dependiendo de la calidad del agua y características de la tubería.

Cabe señalar que la USEPA (2002a), indica que entre las razones para la desinfección secundaria están la inactivación de coliformes y patógenos, que entran a través de las conexiones cruzadas y rupturas en las líneas; y la supresión del crecimiento bacterial y biopelículas en las áreas de agua estancada. El nivel de Carbono Orgánico Asimilable (COA), el tipo y concentración del desinfectante, temperatura del agua, material de la tubería y la hidráulica del sistema son factores que influyen en la concentración del desinfectante en la red de distribución; y por tal razón la prevención del crecimiento y supervivencia de patógenos requiere de una atención estricta del desinfectante residual en todo el sistema. La existencia de corrosión en las tuberías disminuye la cantidad de cloro residual y en consecuencia la penetración de éste a las biopelículas, debido a que se producen reacciones entre los residuales y los productos de la corrosión, puesto que en la tubería (metálica) ocurre la reacción de oxidación la cual esta acoplada con la reducción de un agente oxidante, como las especies de cloro disuelto (reacciones 3 y 4).



A medida que baja el pH (aumenta la concentración de iones hidrogeno H^+) se favorece la reacción de reducción, lo cual requiere del flujo de

electrones de la superficie metálica, ocasionando su oxidación (Sawyer *et al.*, 2001).

Los tipos de cloroaminas presentes también influyen en su efectividad, siendo las monocloroaminas menos efectivas que las dicloroaminas, pero mas efectivas que tricloroamina. Las monocloroaminas son mas ampliamente usadas, mientras que las dicloroaminas tienen una intensidad mas baja de olor, son mas corrosivas y disminuye en predominancia a valores de pH de 7 – 8. Wolfe *et al.* (1.985) encontraron que ni los residuales de cloro ni los de cloroaminas solos fueron capaces de controlar el desarrollo de las biopelículas, sin embargo, cuando éstos fueron combinados si lograron controlarlas.

CONTROL DE LOS NIVELES DE NUTRIENTES

El control de los niveles de nutrientes disponibles para el crecimiento bacterial es la forma mas directa de resolver los problemas de las biopelículas, aunque desafortunadamente, también es el mas difícil. Para controlar los nutrientes bacteriales, los servicios deben adoptar nuevas técnicas de tratamiento y monitoreo. Al reducir el COA en el agua potable, existe doble ventaja: la limitación del crecimiento bacterial y menor consumo de cloro residual en las reacciones químicas laterales con los compuestos orgánicos (Van der Kooij, 1990); ya que la materia orgánica y el cloro libre reaccionan para producir subproductos clorados orgánicos, como trihalometanos (THM) que son de preocupación por sus potenciales efectos sobre la salud. Los THM originados incluyen el cloroformo ($CHCl_3$), el bromodiclorometano ($CHBrCl_2$), el clorodibromometano ($CHClBr_2$) y el bromoformo ($CHBr_3$), todos ellos volátiles. La USEPA ha establecido como valor máximo permisible para la sumatoria de los cuatro THM más importantes un valor 80 mg/L. De hecho, se ha observado una asociación positiva entre la concentración de los productos de la cloración y el riesgo de cáncer de vejiga, colon y recto. Algunos THM, como los que contienen cloro y/o bromo, son cancerígenos y/o teratógenos en bioensayos con animales (Sarmiento *et al.*, 2003).

Una forma de reducir los niveles de COA en el agua es a través del uso de filtros de carbón activado. El carbón activado granulado (CAG) y carbón activado en polvo (CAP) son partículas porosas que adsorben y retienen los contaminantes orgánicos.

Los filtros mixtos de CAG y de arena pueden ser mas efectivos para reducir los niveles de COA que los filtros solamente de arena. Esto es probablemente debido a que el CAG tiene una gran área superficial para soportar el crecimiento biológico y adsorber substratos orgánicos (Van der Kooij, 1990).

Charnock & Kjonno (2.000) reportaron que los filtros de CAG/arena (41cm de CAG sobre 61cm de arena) se desempeñaron mejor que los filtros de arena solamente; ya que tuvieron mejor remoción de la turbidez, mayor duración, menos uso de energía, mayor actividad biológica y fueron menos afectados por los cambios en la temperatura del agua. Aunque estos filtros de doble medio no fueron tan efectivos para la remoción del COA como los sistemas que usan un filtro de arena seguidos por un filtro de CAG, los investigadores concluyeron que los filtros mixtos de CAG/arena son una alternativa más práctica y económica que dos filtros en serie.

USEPA (1992) reporta que la adición de CAP en un reactor de colchones de cieno (reactor en el cual se combinan la coagulación, floculación y sedimentación) se correlacionaba con los niveles mas bajos de COA. Permitir que los microorganismos se adhieran al CAP, produciendo un colchón de cieno “activado biológicamente”, podría reducir aun mas los niveles de COA.

Por otra parte, USEPA (1992) señala la comparación de los efectos del uso del ozono, cloro libre, residual de cloro neutralizado usando tiosulfato de sodio, monocloroamina y la ausencia de predesinfectante sobre la efectividad de los filtros de CAG/arena usados para la remoción del COA. Estos resultados sugieren que muchos filtros de CAG operados convencionalmente podrían ya estar logrando una buena remoción de COA. La preozonación incrementó los niveles de COA en el agua a un promedio de 2,3 veces y los niveles de COA en los efluentes de los filtros siempre resultaron aumentados en relación con el agua no ozonizada. Debido a que el CAG puede rápidamente neutralizar el cloro libre, la aplicación de éste a los filtros de CAG no inhibieron la actividad biológica en el agua. La aplicación de cloroaminas a los filtros de CAG demostró un efecto inhibitorio relativo al cloro libre, y la estabilidad de los residuales de cloroamina permitieron que apareciera un desinfectante residual en el efluente del filtro.

Los niveles de bacterias, determinados por el método de CPH, en los filtros precloraminados fueron 10 veces menores que los valores de colonias encontradas en los filtros preclorinados o preozonados. El tiempo de contacto de los lechos vacíos, o el periodo de tiempo que cada volumen de agua permanece en contacto con el adsorbente, es otra variable a considerar cuando se usa carbón activado biológicamente. LeChevallier *et al.* (1987) reportaron que con un tiempo de contacto de 5 a 10 minutos fue suficiente para reducir la concentración del COA en el agua sin tratar preozonada de un nivel por encima de 450mg/L a un nivel menor de 100mg/L. La USEPA (2002a) menciona que las coliformes y los patógenos oportunistas pueden estar asociados con las partículas de CAG desprendidas de los filtros de CAG. Los procesos de filtración con CAG y CAP requieren un control cuidadoso, así como también un monitoreo cauteloso de la aparición de las partículas de CAG que contienen organismos.

OTROS PUNTOS RELACIONADOS CON EL CONTROL DE LAS BIOPELÍCULAS

Entrenamiento y Mejoramiento del Personal.

La capacidad técnica y el nivel de conocimiento del operador de la planta de tratamiento de agua es muy importante para el éxito de su funcionamiento. Los operadores deben ser responsables de: la protección de la salud publica, mantenimiento del sistema de distribución y del bombeo de las fuentes de agua, calidad del agua de acuerdo a las pruebas y al monitoreo, determinación de las fuentes de contaminación y aplicación de métodos para la eliminación de esas fuentes, realización de los procedimientos de emergencia, llevar archivos y reportes según las regulaciones estatales y nacionales (USEPA, 1992).

Aplicación de la Mejor Tecnología Disponible.

Las Mejores Tecnologías Disponibles (MTDs) son seleccionadas por la EPA, basándose en la efectividad para la remoción o tratamiento de los contaminantes y su eficacia en el cumplimiento de las regulaciones. Las MTDs son propuestas con el Nivel Máximo de Contaminante (NMC) para cualquiera de ellos. Bajo la Regulación de Coliformes Totales, las MTDs para el control de coliformes en el agua potable incluyen: 1.- Protección de las fuentes de la contaminación de coliformes a través de la ubicación y construcción apropiadas de las mismas.

- 2.- Mantenimiento de un residual de desinfección de al menos 0,2 mg/L en todo el sistema de distribución.
- 3.- Mantenimiento apropiado del sistema de distribución incluyendo reparación y reemplazo de la tubería, operación de programas de lavado de las tuberías principales de agua, operación y mantenimiento apropiados de los depósitos y tanques de almacenaje y el mantenimiento de una presión de agua positiva continua en todas las partes del sistema.
- 4.- Filtración y/o desinfección del agua superficial según la Reglamentación del Tratamiento de Aguas Superficiales, o desinfección del agua subterránea.

Estas técnicas fueron escogidas por la EPA ya que tienen la capacidad de cumplir con los NMC para coliformes totales. Las MTDs anteriormente mencionadas podrían no ser adecuadas para resolver presencia de coliformes en sistemas con problemas de biopelículas. Una vez que todas las MTDs están instaladas, el servicio podría controlar las variaciones de los NMC por coliformes totales. El plan de control de las biopelículas, en efecto se convierte en la MTD para ese sistema (USEPA, 1992).

Monitoreo Efectivo

Contempla los siguientes tópicos:

a) Frecuencia del Muestreo. El análisis de los requerimientos del monitoreo para el cumplimiento bacteriológico con las regulaciones involucra un estudio de la existencia de coliformes en un lapso de tiempo específico. Tales datos pueden ser obtenidos de las pruebas bacteriológicas convencionales usando una prueba de presencia / ausencia (P/A), el método de filtro de membrana o el procedimiento de fermentación en tubos múltiples. Cualquier conteo de coliformes o resultado positivo es interpretado como una existencia de coliformes en la muestra. Cuando la prueba P/A excede el 5%, se necesita un monitoreo más intenso del sistema y es obligatorio realizar una búsqueda de coliformes fecales o *E. coli* para ubicar cualquier evento fecal contaminante que pudiera estar encubierto por la presencia de bacterias coliformes de la biopelícula (Letterman, 2001).

b) Selección del Sitio de Muestreo. La estrategia para la selección de un sitio de muestreo debe incluir el diseño de un programa de muestreo para monitorear todas las partes del sistema de distribución. Indistintamente del tamaño del sistema, un porcentaje de muestras debe ser recolectado en ciertos puntos establecidos, tales como: las estaciones de muestreo construidas en la red de tuberías, estaciones de

bombeo, tanques de almacenaje y en los sitios con un historial de presencia de coliformes. Otros sitios deben ser seleccionados al azar en todo el sistema (Letterman, 2001).

c) Selección de la Prueba Bacterial. La selección de pruebas bacteriales para la calidad del agua distribuida puede considerar tres enfoques diferentes, los cuales son: a) prueba de rutina para el cumplimiento del estándar de coliformes, b) inspecciones estacionales para el crecimiento microbiano en las tuberías y c) protocolos investigativos especiales para verificar la contaminación fecal o desarrollo de biopelículas. La prueba de coliformes totales ha sido la prueba bacterial tradicional. En consecuencia, la ausencia de coliformes es una medida indirecta o indicador del riesgo de la salud pública. La revelación de coliformes en las muestras del suministro de agua puede ser realizada por alguno de los siguientes procedimientos de laboratorio: Procedimiento de fermentación de tubo-múltiple, Método de filtro de membrana o Prueba de medio cromogénico. Todos los procedimientos pueden ser configurados para proporcionar un conteo por cada 100ml o una determinación de presencia – ausencia (Letterman, 2001).

d) Interpretación de los Resultados. Cuando las coliformes son detectadas, los hallazgos del laboratorio se deben verificar por los procedimientos descritos en los Métodos Estándares. Posteriormente, se debe solicitar otra muestra del mismo sitio, e incluso aguas arriba y aguas abajo para una repetición de los análisis de coliformes y confirmar si aún existe el evento de contaminación. Los resultados positivos de coliformes subsiguientes deben activar una investigación en los protocolos del tratamiento y en las actividades del manejo de la distribución del agua para buscar la causa de la contaminación. El método de CPH suministra una medida general de la calidad bacterial del agua en el sistema de distribución y puede llegar a ser un signo anticipado del crecimiento microbiano en las paredes de las tuberías del sistema de distribución y en los sedimentos. Las medidas de CPH para las muestras de la distribución pueden ser usadas para monitorear la calidad del agua durante los periodos de ajuste o modificación del proceso de desinfección (Letterman, 2001).

CONCLUSIONES

La formación de las biopelículas causa deterioro en los sistemas de distribución de agua potable, específicamente en las tuberías y tanques

de almacenamiento. Para detectar los problemas de contaminación bacteriológica en las redes de distribución se sugiere una evaluación periódica de bacterias coliformes en diferentes secciones del sistema y de esta manera controlar la calidad de agua potable y en consecuencia resguardar la salud pública. El desarrollo bacteriano depende de la disponibilidad de carbono orgánico asimilable y de nutrientes inorgánicos, de la eficiencia del desinfectante residual, de la temperatura y pH del agua, del tiempo de permanencia del agua en las tuberías y depósitos así como también de las características hidráulicas del sistema.

Como estrategias para el control de la contaminación bacteriológica se recomienda la implantación de un plan para controlar las biopelículas, el cual contempla un programa de mantenimiento, control de la corrosión, prácticas de desinfección, mantenimiento de los depósitos y el control de los niveles de los nutrientes. En el programa de mantenimiento se sugiere mantener una presión positiva en todo el sistema, evitar las conexiones cruzadas, realizar lavados sistemáticos de rutina e incluso limpiezas más profundas en las tuberías cuando éstas lo ameriten, realizar las pruebas de coliformes totales y bacterias heterótrofas, eliminar áreas con bajo flujo y extremos muertos, entre otros. También cabe resaltar que las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs), determinadas por la EPA, son con la finalidad de remover o tratar los contaminantes, las cuales se basan en el Nivel Máximo de Contaminante (NMC) presentes.

Bacteriological contamination of the drinking water distribution systems: revision of control strategies

SUMMARY

The purpose of this investigation was an analysis of the strategies employed to control bacteriological contamination, based on the factors that affect the deterioration of the drinking water distribution systems, as well as their influence on the quality of the water supplied to the consumers. The distribution system is of vital importance to establish the final quality of the water and the biofilms that form on the tube walls are the cause of their deterioration. The grouping of different microorganisms in colonies is considered a defense mechanism; these

colonies benefit from the nutrients and develop resistance to disinfectants. The conclusion and the recommendation is that a maintenance program covering the complete system, including the storage tanks, must be established as a strategy for controlling bacteriological contamination. It is also necessary to control corrosion and the level of nutrients and to perform adequate disinfection procedures; these measures must be applied by constantly trained personnel.

Key Words: Distribution network, potable water, bacteriological contamination.

REFERENCIAS

- AWWA (2002). With assistance from Economic and Engineering Services, Inc. Finished Water Storage Facilities. [On-line]. Consultado en: [http:// www.google.com](http://www.google.com)
- Allen M., Geldreich E. & Taylor R. (1979). *The occurrence of microorganisms on water main encrustations*. Proceedings of the Water Quality Technology Conference, Philadelphia. PA. American Water Works Association, Denver, CO.
- Carvajal L., Gómez A. & Ochoa S. (2006). Simulación de un Lavado Hidráulico en Tuberías para el Control del Crecimiento de Biopelícula. *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*. **74**: 63-72.
- Charnock C. & Kjonno O. (2000). Assimilable Organic Carbon and Biodegradable Dissolved Organic Carbon in Norwegian Raw and Drinking Waters. *Wat. Res.* **34**: 2629-2642.
- Gaceta Oficial de la República de Venezuela. Año CXXV-Mes V. N° 36.395. Decreto MSAS N° SG-018-98. Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable (1998). Capítulo II. Art. 8 hasta 13. Capítulo III. Art. 14, Caracas. Disponible en: <http://www.defensoria.gov.ve>
- Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.453. Extraordinaria (2000). Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Capítulo V. Art. 83,84, Caracas, 97 pp. Disponible en: <http://www.defensoria.gov.ve>
- Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.568. Extraordinario (2001). Ley

- Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento, Caracas. Disponible en: <http://www.defensoria.gov.ve>.
- Knobelsdorf J. & Mujeriego R. (1997). Crecimiento Bacteriano en las Redes de Distribución de Agua Potable: Una Revisión Bibliográfica. *Ingeniería del Agua*. **4**: 17-28.
- Le Chevallier M., Babcock T. & Lee R. (1987). Examination and characterization of distribution system biofilms. *Appl. Environ. Microbiol.* **53**: 2714-2724.
- Le Chevallier M., Cawthorn C. & Lee R. (1988b). Inactivation of biofilm bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* **54**: 2492-2499.
- Le Chevallier M., Lowry C. & Lee R. (1990b). Desinfection of biofilms in a model distribution system. *J. AWWA*. **82**: 87-89.
- Letterman R. (2001). *Water Quality and Treatment*. 5th edition. Ed. McGraw-Hill, INC., New York.
- Mora V., Cedeño J. & Garcia A. (2005). Calidad y Corrosión en Aguas de las Plantas de Tratamiento Angostura y Guri del Estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Malariol. y Sal. Amb.* **45**: 127-137.
- Muñoz L. F. Velocidad de Desprendimiento de las Biopelículas en Tuberías de Distribución de Agua Potable. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. [On-line]. Consultado en: <http://www.google.com>
- Reyes del Toro P. & Saldarriaga J. (2005). Comportamiento de Biopelículas luego de Lavados Sucesivos en Tuberías de Agua a Presión. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*. **22**: 142-150.
- Ridgway H. & Olson B. (1981). Scanning electron microscope evidence for bacterial colonization of a drinking water distribution system. *Appl. Environ. Microbiol.* **41**: 274-287.
- Ríos J., Calderón J., Echeverría F. & Peñuela G. (2008). Diseño de un Sistema Piloto para el Estudio de la Corrosión del Material de Tuberías y su Contribución en el Deterioro de la Calidad del Agua Potable. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. **43**: 102-113.
- Sarmiento A., Rojas M., Medina E., Olivet C. & Casanova J. (2003). Investigación de Trihalometanos en Agua Potable del Estado Carabobo. *Venezuela. Gac. Sanit.* **17**: 137 – 143.
- Sawyer C., McCarty P. & Parkin G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. (4ª ed.) McGraw-Hill Interamericana, S. A. Bogotá, Colombia.
- Tuovinen O., Button K., Vuorinen A. Carson L., Mair D. & Yut L. (1980). Bacterial, chemical and mineralogical characteristics of tubercles in distribution pipelines. *J. AWWA*. **72**: 626-635.
- USEPA (1992). Control of Biofilm Growth in Drinking Water Distribution Systems. EPA/625/R-92/001. Office of Research and Development, Washington, DC. [On-line]. Consultado en: <http://www.epa.gov>
- USEPA (2002a). Health Risks from Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems. [On-line]. Consultado en: <http://www.epa.gov>
- USEPA (2002b). Potential Contamination Due to Cross-Connections and Backflow and the Associated Health Risks. EPA's Office of Ground Water and Drinking Water. [On-line]. Consultado en: <http://www.epa.gov>
- Van der Kooij D. (1992). Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth. *J. AWWA*. **84**: 57-65
- Van der Kooij D. (1990). Assimilable organic carbon (AOC) in drinking water. *Drinking Water Microbiology* Springer-Verlag, New York.
- Wolfe R., Ward N. & Olson B. (1985). Inactivation of heterotrophic bacterial populations in finished drinking water by chlorine and chloramines. *Water Res.* **19**: 1393-1403.

Recibido el 03/06/2007
Aceptado el 28/04/2008