

ABATIMIENTO DE LA BIOPELÍCULA EN SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

Susana SILVA MARTÍNEZ, Esteban MARTÍNEZ MEZA y Alberto ÁLVAREZ GALLEGOS

CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, 62210 Col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor., correo electrónico: ssilva@uaem.mx

(Recibido abril 2003, aceptado diciembre 2003)

Palabras clave: biopelícula, corrosión influida microbiológicamente, bacterias coliformes, bacterias relacionadas con hierro, bacterias sulfato reductoras, cloro

RESUMEN

Se observó el desarrollo de la biopelícula en testigos de *admiralty* (70Cu-30Ni) y en los componentes del sistema de flujo continuo. El agua contenía una carga bacteriana (10^6 - 10^7 unidades formadoras de colonias por mL) similar a la encontrada en los sistemas de enfriamiento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La eliminación de la biopelícula y el abatimiento de las poblaciones bacterianas se llevó a cabo empleando una combinación de cloro con iones de plata y cobre generados electrolíticamente. Los resultados mostraron evidencias de corrosión influida microbiológicamente (CIM). Los sistemas estudiados de plata/cobre y plata/cobre/cloro mostraron ser efectivos en la inhibición de la actividad de las poblaciones bacterianas que promueven la corrosión microbiana y la formación de biopelícula a niveles que compiten con el uso de cloro (4 ppm) para controlar a los microorganismos en los sistemas de enfriamiento, por lo que son una opción para disminuir el impacto ambiental por el uso del cloro.

Key words: biofilm, microbiologically influenced corrosion, coliform bacteria, iron related bacteria, sulfate reducing bacteria, chlorine

ABSTRACT

Biofilm formation was observed on the components of the experimental dynamic system and on admiralty coupons (70Cu-30Ni). The content of bacteria populations in test water was similar to that commonly found (10^6 - 10^7 colony forming units per mL) in the cooling water systems of Comisión Federal de Electricidad (CFE). Biofilm and bacteria were treated employing reduced levels of chlorine combined with electrolytically generated silver and copper ions. The results clearly showed evidence of microbiologically influenced corrosion on the coupons. The disinfectant systems of silver/copper and silver/copper/chlorine have shown to lower the aggressivity of bacteria populations that promote microbiologically influenced corrosion and biofilm formation to levels that compete with the use of high concentrations of chlorine (4 ppm) for the treatment of cooling tower systems, thus those systems are an option to diminish the environmental impact of chlorine.

INTRODUCCIÓN

El proceso de bio-ensuciamiento puede definirse como el desarrollo de biopelículas microbianas de espesor y composición variada sobre cualquier superficie en contacto con éstos. En medios acuosos los microorganismos se adhieren a superficies metálicas y las colonizan hasta formar biopelículas produciendo un ambiente, en la interfase metal-biopelícula, radicalmente diferente en términos de pH, oxígeno disuelto, y especies orgánicas e inorgánicas, originando reacciones electroquímicas que controlan las velocidades de corrosión (Little *et al.* 1991).

El proceso de corrosión como resultado de la presencia y actividad de los microorganismos entre la biopelícula y la superficie metálica se denomina corrosión influida microbiológicamente (CIM). En sistemas de enfriamiento la CIM ocurre cuando existe una combinación de factores biológicos que interactúan con la química del agua, temperatura, velocidad de flujo y metalografía del sistema. Las biopelículas alojan a organismos patógenos proporcionándoles protección de la acción del desinfectante. Bajo estas circunstancias, el nivel de oxígeno en las capas internas de las biopelículas es deficiente, promoviendo el crecimiento de bacterias anaerobias incluyendo a las sulfato reductoras (BSR) y a las relacionadas con hierro (BRF). Las BRF y BSR son bacterias encontradas comúnmente en los sistemas de enfriamiento. Estos microorganismos están asociados con mecanismos que influyen pero no inician los procesos de corrosión (Lutey 2001). Las biopelículas y la CIM son los problemas más comunes que enfrenta un sistema de enfriamiento debido a que reducen la eficiencia en la transferencia de calor, ocasionan pérdidas de producción e incremento en los costos de mantenimiento. La industria eléctrica ha mostrado preocupación e interés en el control y monitoreo tanto de la actividad biológica como del fenómeno de corrosión en los sistemas de enfriamiento con el fin de mantenerlos en óptimas condiciones y disminuir los paros no programados (Little *et al.* 1991, Boronstein *et al.* 1994, Licina *et al.* 1996, 1997, Beardwood *et al.* 1999, Green *et al.* 1999, Jones *et al.* 2000).

El control de las biopelículas y de las poblaciones bacterianas en los sistemas de enfriamiento (SE), se lleva a cabo comúnmente mediante el uso de cloro debido a que es de bajo costo y su dosificación es relativamente fácil (Beardwood 1995, McCall *et al.* 1999, Colclasure 2001, Gump 2001). Sin embargo, el uso del cloro tiene limitaciones (Jolley 1977, White 1992) y algunas de ellas se han vuelto más importantes en la última década: a. Oxidación de aleaciones de cobre, las más usadas en intercambiadores de calor en los sistemas de enfriamiento, b. Efluentes industriales con altos contenidos de cobre y cloro, c. Es tóxico, no solamente contra los organismos

que se desea abatir sino contra otros que no fueron contemplados en el programa del tratamiento, d. En algunos casos una técnica de descloración en el efluente es necesaria, e. La eficiencia de la cloración depende del pH y de la temperatura y f. Alto impacto ambiental.

Estas limitaciones han justificado la búsqueda de mejores alternativas de tratamiento de agua para el control de la biopelícula y de las poblaciones bacterianas en aguas de enfriamiento (McCall *et al.* 1999, Lutey 2000, Court *et al.* 2000, Colclasure 2001, Opheim 2001). Sin embargo, las alternativas que controlan efectivamente el crecimiento de microorganismos enfrentan el mismo problema que el cloro: alto impacto ambiental y son entre dos y diez veces más caras (Lutey 2000). El desinfectante ideal sería el que sólo proporcionara efectos con un impacto mínimo al ambiente.

Actualmente se considera a la electroquímica como una herramienta prometedora para el tratamiento de aguas residuales sin afectar adversamente el ambiente (Genders y Weinberg 1992). Los contaminantes orgánicos pueden ser inactivados electroquímicamente por medio de su oxidación directamente sobre la superficie del ánodo (Comninellis 1994) o indirectamente a través de la electrogeneración de especies muy oxidantes (Álvarez y Pletcher 1999). Asimismo, los microorganismos pueden ser inactivados electroquímicamente ya sea directamente o por medio de la electrogeneración de un agente desinfectante tal como el peróxido de oxígeno (Dhar *et al.* 1981, Shimada *et al.* 1982, Ponta *et al.* 1986). Los iones metálicos también pueden ser electrogenerados y tienen propiedades desinfectantes que inactivan a los microorganismos, por ejemplo los iones plata y cobre (Richards 1981, Domek *et al.* 1987, Kutz *et al.* 1988, Landeen *et al.* 1989a,b, Thurman y Gerba 1989, Yahya, *et al.* 1990, Silva *et al.* 2002). Los iones plata, a niveles vestigiales, son tóxicos para muchos microorganismos. A estos niveles, los iones Ag^+ inactivaron a 99.43 % de los microorganismos presentes en agua conteniendo 10^7 microorganismos/mL (principalmente *E. coli*) en el compartimiento anódico de la celda electroquímica con un tiempo de contacto de 4 segundos (Eibl 1977). Otra ventaja de la electrogeneración de iones Ag^+ es que éstos pueden ser recuperados, confiriendo a la electroquímica la cualidad de ser una herramienta muy atractiva desde el punto de vista ambiental y económico (Eibl 1977). Los iones de plata son capaces de inactivar gran variedad de bacterias y virus (Richards 1981, Kutz *et al.* 1988). En forma similar, los iones Cu^{2+} son empleados para tratar agua de albercas, prevención de bioensuciamiento marino (Nakasono *et al.* 1992) y como alguicida en ambientes acuáticos (Thurman y Gerba 1989). Las propiedades desinfectantes de estos iones han sido ampliamente estudiadas para desinfectar agua en presencia de una o dos cepas puras de bacterias contenidas, principalmente, en agua potable (Domek *et al.* 1984,

Landeen *et al.* 1989b, Bosch *et al.* 1993, Cassells *et al.* 1995, Rohr *et al.* 2000), agua de albercas (Landeen *et al.* 1989a) o agua proveniente de hospitales (Kutz *et al.* 1988). Sin embargo, estos estudios representan parcialmente el efecto real de los iones plata y cobre debido a que los microorganismos forman comunidades bacterianas siendo, algunas veces, bastante complejas y como consecuencia desarrollan biopelículas como medio de crecimiento y supervivencia en los medios acuáticos.

La electrogeneración *in situ* de iones de plata y cobre puede ser una buena alternativa con gran potencial de uso para el tratamiento de los sistemas de enfriamiento en el control del bio-ensuciamiento con un impacto ambiental mínimo. En el presente estudio se propone el uso de iones de plata y de cobre combinados con cloro, a concentraciones relativamente bajas (0.3 ppm) en comparación con las concentraciones de cloro empleadas en los sistemas de enfriamiento (3.0-4.0 ppm), para el control tanto de las poblaciones bacterianas como de las biopelículas comúnmente presentes en estos sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron tres sistemas desinfectantes: a. cloro (0.3, 1.0 y 3.0 ppm), b. combinación de plata (0.2 y 1.2 ppm) con cobre (0.6 y 1.2 ppm) y c. combinación de cloro (0.3 y 1.0 ppm) con plata (0.2 ppm) y cobre (1.2 ppm). La concentración de los desinfectantes se seleccionó con base en estudios previos (Just *et al.* 1936, Silva *et al.* 2001a,b). La experimentación se llevó a cabo en un sistema de flujo continuo operado en forma similar a un SE. El pH se controló con la adición de ácido sulfúrico en el intervalo de 7 a 8 y la temperatura en el intervalo de 27 ± 5 °C. La temperatura, pH, flujo de agua y conductividad se registraron en línea durante 72 horas, tiempo de duración de los experimentos.

Sistema experimental

El agua bajo estudio provino de la planta de tratamiento del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y se seleccionó con base en las siguientes razones. 1. Contiene una composición química (alcalinidad, dureza total, dureza al calcio, cloruros, sulfatos, etc.) y biológica (bacterias coliformes, relacionadas con hierro y sulfato reductoras) similar al agua de repuesto del sistema de enfriamiento (SE) de la Central Termoeléctrica de Valle de México (CTVM). 2. El agua de repuesto de la CTVM y el agua bajo estudio se tratan mediante el proceso de lodos activados. Este proceso se lleva a cabo debido a que la CTVM se provee de agua del Gran Canal que recibe desechos de agua municipal e industrial. Estudios previos (Silva *et al.* 2001a,b, 2002) mostraron que las poblaciones bacterianas presentan un comportamien-

to similar en ambos tipos de agua. 3. Los microorganismos están presentes en el agua en su hábitat natural siendo los mismos que forman biopelículas y promueven el CIM en los SE; además de exhibir un comportamiento bastante diferente al mostrado por cepas puras.

La experimentación se llevó a cabo en un sistema de flujo continuo (Silva *et al.* 2002) en donde se simuló la operación de un sistema de enfriamiento manteniendo el pH en el intervalo de 7 a 8 mediante la adición de una solución diluida de ácido sulfúrico y temperatura de 27 ± 5 °C. Se registraron en línea los parámetros de pH, conductividad, flujo de agua (0.13 L/s) y temperatura.

El sistema de flujo continuo se acondicionó durante 24 horas antes de iniciar la prueba microbiológica bajo estudio. El acondicionamiento consistió en circular, antes de cada experimento, 11 litros de una solución de ácido nítrico al 12 % para lavar el sistema y para desadsorber (Landeen *et al.* 1989b) los iones metálicos que se pudieron haber adsorbido en pruebas anteriores. El sistema de flujo continuo se enjuagó con agua destilada y finalmente, una solución del desinfectante a la concentración de interés se circuló con el fin de satisfacer las demandas de los componentes del sistema experimental que podrían reducir la cantidad de desinfectante disponible durante el experimento. Once litros de agua bajo estudio se usaron en cada experimento cuya duración fue de 72 horas. El volumen de agua inicial no se mantuvo constante durante la experimentación debido a la evaporación natural (0.2 L/día aproximadamente) y al muestreo (0.8 L/día) que se efectuó a diferentes períodos de tiempo para analizar las bacterias presentes en el agua.

Desinfectante empleado

Las soluciones desinfectantes se prepararon a partir de soluciones concentradas de iones plata y cobre recién generadas electrolíticamente en agua destilada. Una solución comercial de hipoclorito de sodio con un contenido de cloro libre al 6 % se usó para preparar las soluciones de cloro al momento de necesitarse. Las soluciones desinfectantes (HACH Company, 1997) se analizaron inmediatamente después de prepararse para conocer su concentración exacta.

Análisis de bacterias

Durante la experimentación se analizaron bacterias coliformes, empleando un estuche de pruebas Colilert (IDEXX 2000), relacionadas con hierro (BRI) y sulfato reductoras (BSR), usando las pruebas de reacción de la actividad biológica (BART™ 2000). Las pruebas Colilert permiten detectar el Número Más Probable por 100 mL (NMP/100 mL) en un periodo de incubación de 24 horas en presencia de 2×10^6 bacterias heterótrofas por 100 mL; mientras que BART permite detectar 10 ufc/mL de BRI y BSR.

Desarrollo de la biopelícula

El desarrollo de la biopelícula se observó en testigos de *admiralty* (Cu70/Ni30), material que tienen los condensadores de la CFE y en los componentes del sistema de flujo continuo. El sistema de flujo continuo se acondicionó siguiendo el protocolo presentado en la sección sistema experimental y se procedió a colocar diez testigos de *admiralty* (previamente pulidos con lija fina) en el estanque y cuatro en el porta-testigos. Posteriormente, se adicionó el agua bajo estudio (11 litros) al estanque y se mantuvo en circulación por 40 días aproximadamente controlando solamente la temperatura del agua ($27 \pm 5^\circ\text{C}$). Se adicionó agua cada 3 ó 4 días para reponer las pérdidas por evaporación. Los primeros indicios de formación de biopelícula se observaron 15 días después de estar circulando el agua. A los siguientes 40 días, una capa densa de la película microbiana se había adherido a la superficie de la bomba. En ese momento se apagó la bomba, se retiraron los testigos, se tomaron fotografías del estanque y la bomba y, finalmente, se drenó el agua lentamente para evitar pérdidas de biopelícula. Una vez drenada el agua bajo estudio, se adicionaron 11 litros de una solución de $\text{Ag}^+/\text{Cu}^{2+}$ (preparada con agua destilada) dejándola circular durante 48 horas y se registró el efecto desinfectante sobre la biopelícula mediante una fotografía.

Un segundo experimento se llevó a cabo en forma similar empleando $\text{Ag}^+/\text{Cu}^{2+}/\text{Cl}_2$ como desinfectante, excepto que se realizó una segunda adición del desinfectante después de las primeras 48 horas de circulación y se dejó en estas condiciones otras 48 horas.

Con respecto a los testigos de *admiralty*, una vez formada la biopelícula, se procedió como sigue: cuatro testigos se secaron en las condiciones del cuarto experimental a temperatura ambiente, otros cuatro fueron sumergidos en una solución de $\text{Ag}^+/\text{Cu}^{2+}$ y otros cuatro en una solución de $\text{Ag}^+/\text{Cu}^{2+}/\text{Cl}_2$, permaneciendo en las so-

luciones por espacio de 48 a 72 horas. Posteriormente, la morfología de estos testigos fue observada en el microscopio de barrido electrónico (DSM 960, ZEISS).

RESULTADOS

Parámetros medidos

La variación de los parámetros de pH, conductividad y temperatura a lo largo del experimento se muestra en la **figura 1**. Generalmente se estableció un buen control de pH en todos los experimentos. La **figura 1a** presenta el intervalo de pH en el que se llevaron a cabo los experimentos y se observa que el pH se mantuvo en un valor promedio de 7.5. Del comportamiento de la conductividad en el sistema acuoso se puede inferir el aumento en la concentración de sales minerales debido a la evaporación del agua (**Fig. 1b**). Como consecuencia de esto último se origina un potencial incrustante en el agua que posteriormente se reflejará en problemas de incrustación y corrosión química (Silva y Álvarez 1993, 1994). En esta forma se crean condiciones únicas para que los microorganismos contribuyan al CIM (Lutey 2001). La temperatura (**Fig. 1c**) exhibe un comportamiento de fluctuación cíclica indicando periodos durante el día y la noche. Esto también refleja los problemas asociados con la evaporación del agua.

Bacterias coliformes

En los primeros 30 minutos la inactivación de coliformes totales y *E. coli* por los sistemas desinfectantes de cloro (**Fig. 2**) es relativamente más rápida comparada con cloro y su combinación con iones de plata y cobre (**Fig. 3**). Las coliformes totales (**Fig. 2a**) muestran una recuperación del crecimiento después de 5 horas de contacto con cloro. Aún cuando éste logra abatirlas en más de 99 %, las bacterias se mantienen

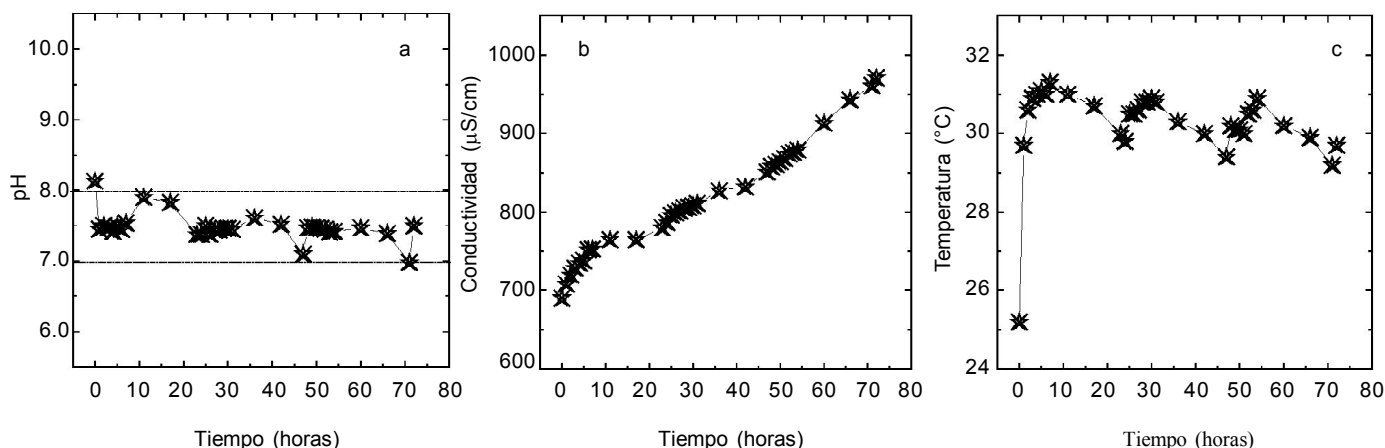


Fig. 1. Comportamiento de los parámetros: a. pH, b. Conductividad y c. Temperatura durante la experimentación en continuo

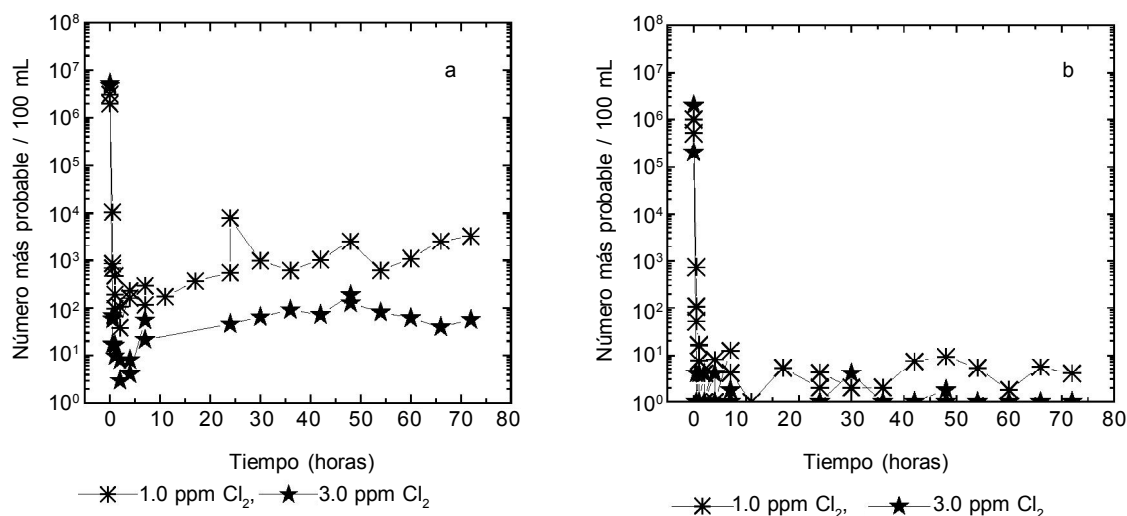


Fig. 2. Número más probable de bacterias coliformes con el sistema desinfectante de cloro. a. Coliformes totales. b. *E. coli*.

entre 100 y 1000 NMP/100 mL en ambas concentraciones. Sin embargo, las *E. coli* (**Fig. 2b**) son prácticamente aniquiladas desde los primeros minutos de contacto con cloro. Los sistemas desinfectantes de plata/cobre y plata/cobre/cloro inactivan en más de 99 % a las coliformes totales y a *E. coli* en los primeros 30 minutos de contacto (**Fig. 3a,b**). El sistema plata/cobre mantiene a las bacterias coliformes alrededor de 1000 NMP/100mL mientras que su combinación con cloro disminuye su contenido a valores de 10 NMP/100mL aproximadamente, observándose un mayor impacto en *E. coli* (**Fig. 3b**). La **figura 3a** indica que las coliformes totales

muestran una recuperación del crecimiento de hasta 1000 NMP/100mL después de 35 horas de contacto con cloro a 0.3 ppm y su combinación con iones plata y cobre. Estas relaciones de concentración aniquilaron a las bacterias coliformes manteniéndolas a niveles que compiten con otros tratamientos de agua de enfriamiento.

Abatimiento de la biopelícula

La biopelícula se forma tanto en los componentes del sistema de flujo continuo, siendo muy evidente en la bomba de circulación de agua, como en los testigos de *admiralty*(Cu70/Ni30).

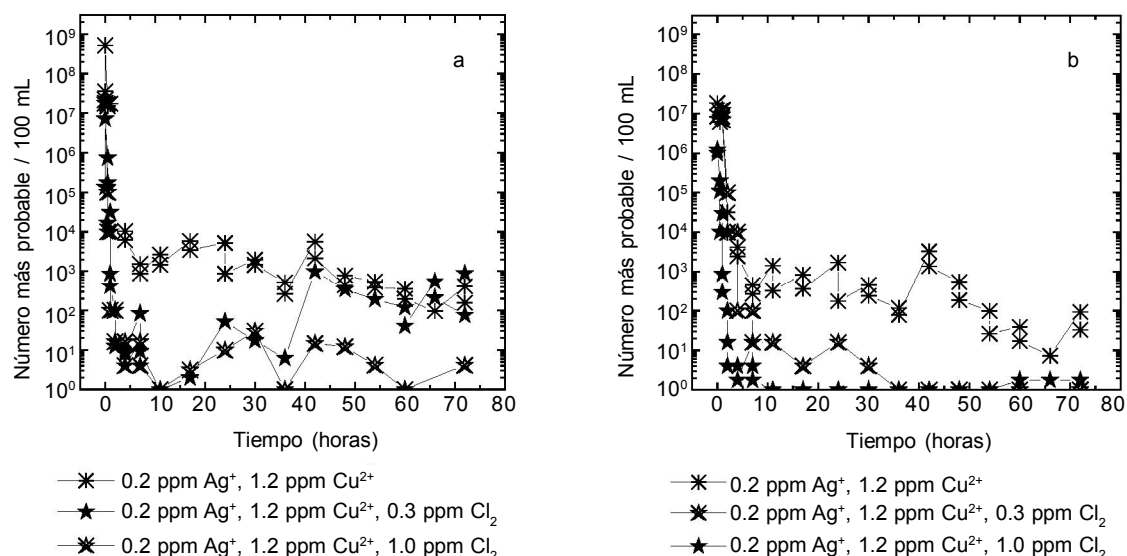


Fig. 3. Número más probable de bacterias coliformes con los sistemas desinfectantes de plata/cobre/cloro. a. Coliformes totales. b. *E. coli*.

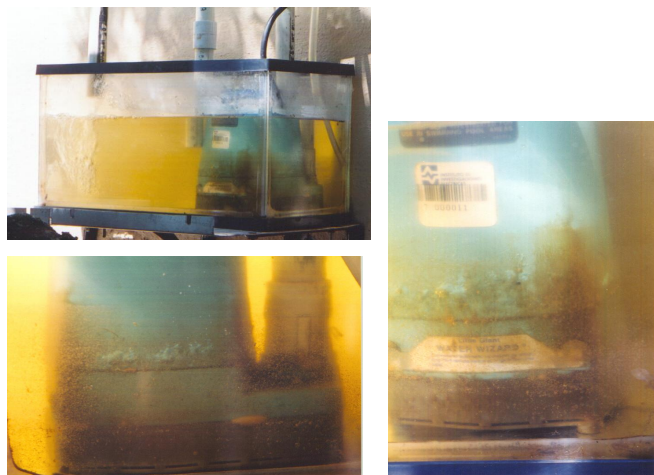


Fig. 4. Desarrollo de la biopelícula en la bomba de circulación de agua del sistema hidráulico. La muestra de agua estuvo circulando en el sistema hidráulico durante 40 días

La **figura 4** muestra tres fotografías de la bomba de circulación de agua en donde se observa una densa capa de materia orgánica adherida a la superficie de la bomba y el tubo de PVC. Posteriormente, se adiciona una solución desinfectante de 1.2 ppm Ag^+ /0.6 ppm Cu^{2+} manteniéndose en circulación por espacio de 48 horas en el sistema experimental (**Fig. 5**). La **figura 5** muestra la ausencia de la mayor parte de la densa capa orgánica en la bomba y el tubo de PVC debido a la acción desinfectante de los iones plata y cobre. Un segundo experimento de desarrollo de biopelícula se llevó a cabo para observar el efecto del desinfectante de cloro combinado con iones plata y cobre. Se circuló agua bajo estudio durante 45 días bajo las mismas condiciones previas y se registró la formación de biopelícula en la bomba de circulación de agua (**Fig. 6a**). Posteriormente, se adicionó



Fig. 5. Fotografía tomada después del tratamiento de la biopelícula con la circulación del desinfectante 1.2 ppm Ag^+ /0.6 ppm Cu^{2+} durante 48 horas

una solución desinfectante de 0.2 ppm Ag^+ /1.2 ppm Cu^{2+} /0.3 ppm Cl_2 manteniéndose en circulación por 48 horas en el sistema experimental (**Fig. 6b**). Finalmente, una segunda adición del mismo desinfectante se hizo circular por espacio de 48 horas (**Fig. 6c**). Se observa que el desinfectante elimina la mayor parte de la biopelícula formada sobre la superficie de la bomba.

La **figura 7** presenta la morfología de dos testigos sumergidos en el agua bajo estudio durante 40 días y muestra el deterioro de la superficie de los testigos debido a la composición química y microbiológica del agua. Los aglomerados blancos constituyen depósitos de sales minerales, lo que demuestra una concentración alta de sales debido a la evaporación del agua. Las zonas negras indican corrosión localizada, mientras que los depósitos en forma de pequeños rodillos o granos de arroz

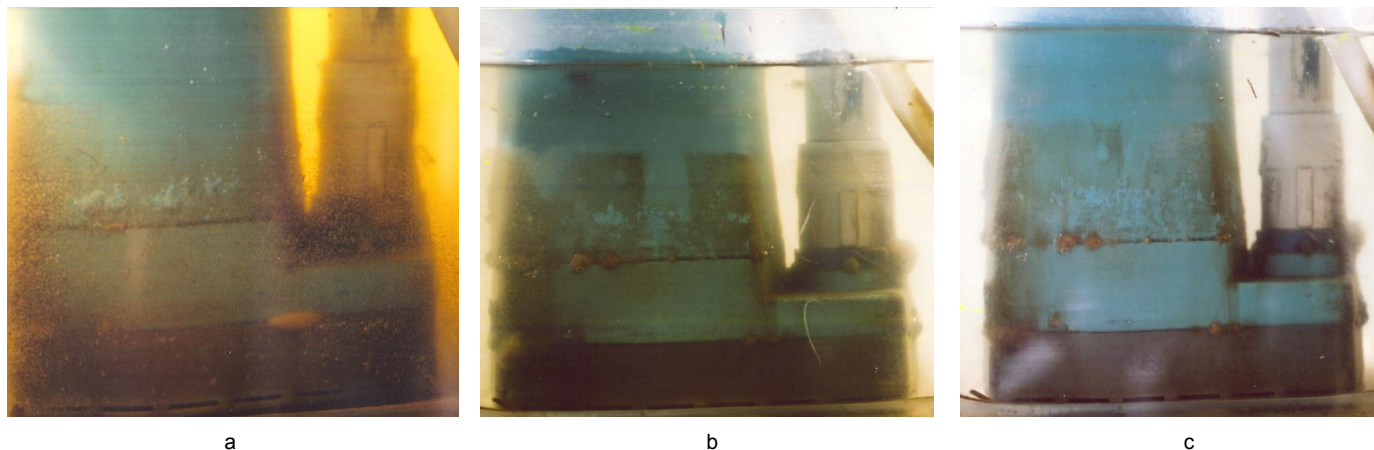


Fig. 6. Biopelícula en la bomba de circulación de agua del sistema hidráulico. a. Circulación de la muestra de agua durante 45 días. b. Fotografía tomada después de 48 horas de la primera adición de 0.2 ppm Ag^+ /1.2 ppm Cu^{2+} /0.3 ppm Cl_2 . c. Fotografía tomada después de 48 horas de la segunda adición de 0.2 ppm Ag^+ /1.2 ppm Cu^{2+} /0.3 ppm Cl_2

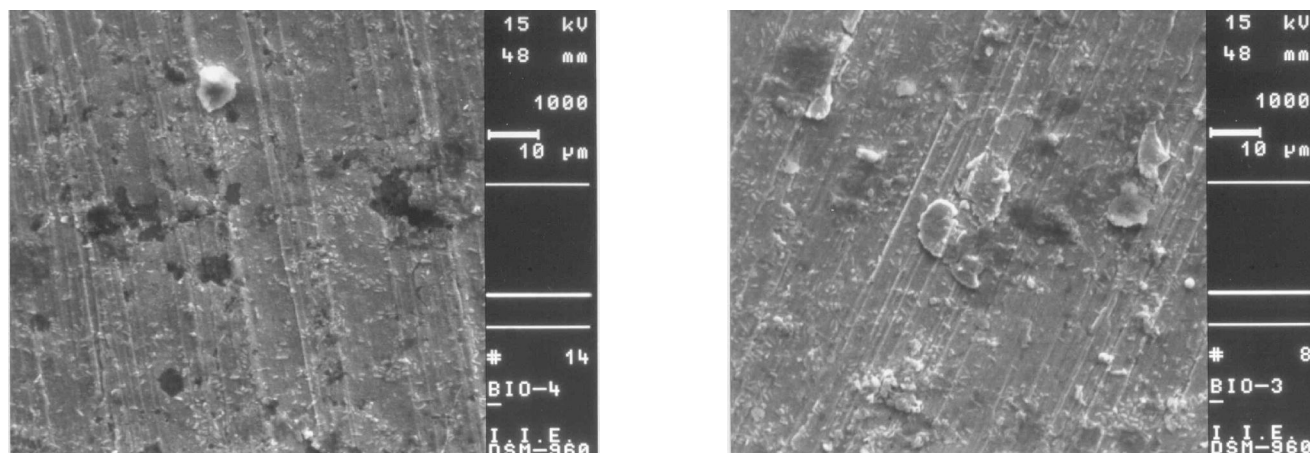


Fig. 7. Morfología de testigos de *admiralty* sumergidos en la muestra de agua durante 40 días

son evidencias de la presencia de microorganismos. El estado de la superficie del testigo, usado como blanco, se presenta en la **figura 8** en la que se aprecia la dirección del pulido del testigo. La **figura 9** muestra la morfología de dos testigos (previamente sumergidos en el agua bajo estudio durante 40 días) después de haber estado en contacto con una solución de 1.2 ppm Ag^+ /0.6 ppm Cu^{2+} durante 48 horas (**Fig. 9a**) y 72 horas (**Fig. 9b**). En ambas figuras es clara la ausencia de depósitos microbiológicos confirmando la efectividad de los iones de plata y cobre observada en estudios previos. Asimismo, en la **figura 9** se nota la existencia de zonas deterioradas debido a la corrosión y algunas zonas blancas indicando la presencia de depósitos minerales. Un escenario similar se presenta en la **figura 10**, que muestra la morfología de dos testigos después de haber eliminado la biopelícula de su superficie con una solución de 0.2 ppm Ag^+ /1.2 ppm Cu^{2+} /0.3 ppm Cl_2 durante 72 horas.

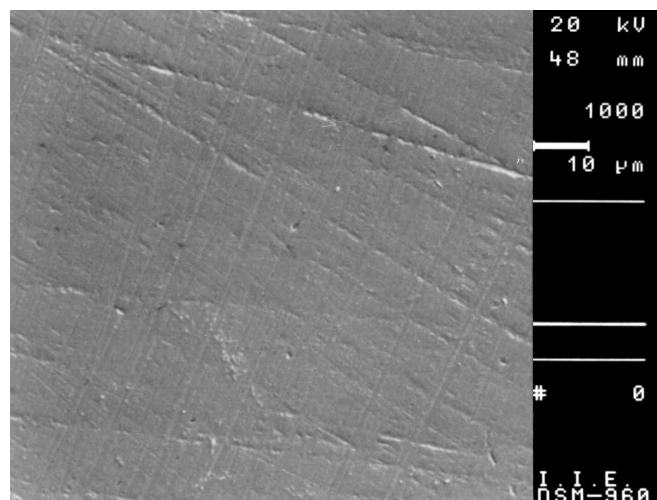


Fig. 8. Morfología de testigo de *admiralty* usado como testigo

DISCUSIÓN

Son varios los factores involucrados para que el fenómeno de corrosión se manifieste en los componentes de un sistema de enfriamiento, entre estos se pueden mencionar: la composición y concentración de las especies químicas existentes en el agua de enfriamiento, el pH, la concentración de sales minerales debido a la evaporación, la metalurgia de los tubos del condensador, los microorganismos presentes en el agua de enfriamiento, etc. Sin embargo, el desarrollo de corrosión influida microbiológicamente ocurre cuando una combinación de factores biológicos interactúan con la química del agua, la temperatura, la velocidad de flujo, la metalurgia del condensador y la presencia de ensuciamiento orgánico e inorgánico. Es sabido que la biopelícula proporciona nutrientes y protección de la acción desinfectante a las bacterias promotoras de la corrosión. Una vez que el sistema de enfriamiento está invadido con bacterias y películas microbianas, la única alternativa viable para su limpieza es por medios mecánicos. Por eso es importante establecer un tratamiento adecuado de los sistemas de enfriamiento y mejor aún si no ocasiona efectos negativos al ambiente.

Las relaciones de concentración de los desinfectantes propuestos en este estudio mostraron efectividad para disminuir apreciablemente tanto la población de las bacterias coliformes, como la biopelícula adherida en la bomba de circulación de agua y en los testigos de *admiralty*. Estudios previos (Silva *et al.* 2001a, 2002) revelaron que las bacterias relacionadas con hierro, sulfato reductoras y formadoras de lama son las principales promotoras de la formación de la biopelícula registrada en estas figuras (**Figs. 4-6**) y como consecuencia el desarrollo de la CIM. Estas figuras ponen de manifiesto que los sistemas desinfectantes propuestos son efectivos para disminuir tanto las bacterias

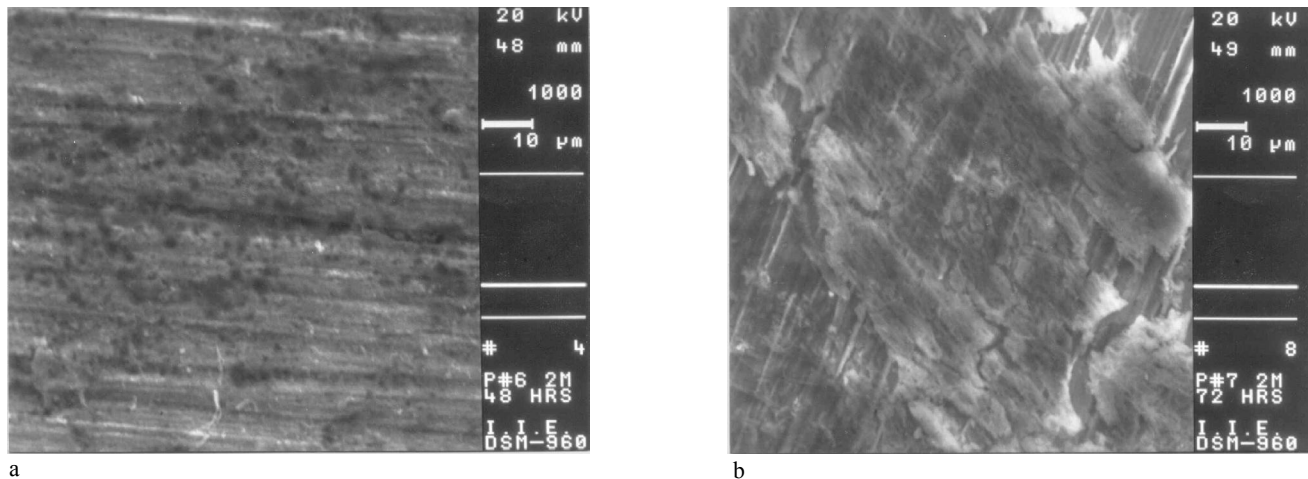


Fig. 9. Morfología de testigos de *admiralty* sumergidos en 1.2 ppm Ag^+ /0.6 ppm Cu^{2+} durante: a. 48 horas. b. 72 horas

formadoras de la biopelícula como la biopelícula misma y como consecuencia los problemas asociados con el CIM son menores. De esta forma, pueden ser empleados como una alternativa al uso de cloro o bien permitirían reducir la concentración de cloro en los SE disminuyendo los riesgos que conlleva su uso tanto para el ambiente como para los componentes de los SE y del personal involucrado en su manejo. Es cierto que el costo asociado con la implementación de los desinfectantes propuestos es alto (Silva *et al.* 2002) al igual que el de otras tecnologías de tratamiento para el control microbiológico (Court *et al.* 2000, Cloclasure 2001, Gump 2001). Sin embargo, se ha documentado (Woodward 1963, Thurman y Gerba 1989) que los iones plata se adsorben a las superficies del recipiente que los contiene, proporcionando un efecto germicida continuo, aún después de interrumpir la adición de iones plata al sistema acuoso. Si este comportamiento se observa en un sistema de enfriamiento real, se puede especular que

los costos bajarían. Una situación similar ocurriría si se logra abatir el riesgo en el manejo del cloro y su impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto 31145-U) y al Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

Álvarez A. y Pletcher D. (1999). The removal of low level organics via hydrogen peroxide formed in a reticulated vitreous carbon cathode cell. Part 2: The removal of

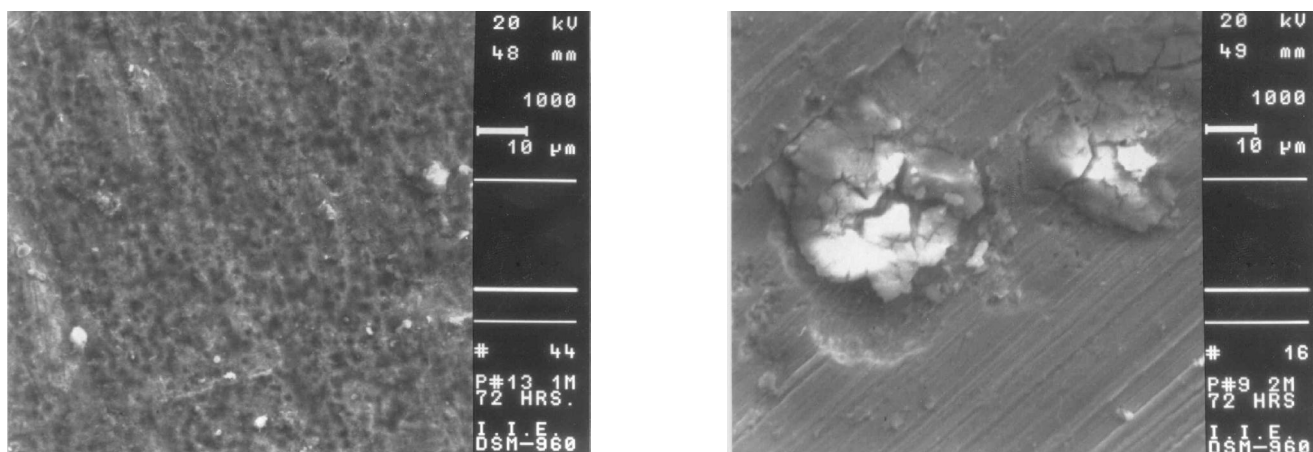


Fig. 10. Morfología de testigos de *admiralty* sumergidos en 0.2 ppm Ag^+ /1.2 ppm Cu^{2+} /0.3 ppm Cl_2 durante 72 horas

- phenols and related compounds from aqueous effluents. *Electrochimica Acta*. 44, 2483-2492.
- BART™ (<http://www.dbi.sk.ca/droycon/BARTs.html>). Mayo 2002
- Beardwood E. S. (1995). Modeling and performance monitoring of biofilms. *Corrosion/95*, Paper No. 221, NACE International. 201/1-201-16.
- Beardwood E. S. y Therrien J. K. (1999). Detection and reduction of biofilms in industrial cooling waters. International Water Conference. IWC-99-71, Pittsburgh, PA., EUA.
- Boronstein S. W. y Licina G. J. (1994). Inspecting and monitoring for biofouling and corrosion. international power generation conference, Phoenix, PA., EUA.
- Bosch A., Díez J.M. y Abad F.X. (1993). Disinfection of human enteric viruses in water by copper:silver and reduced levels of chlorine. *Wat. Sci. Tech.* 27, 351-356.
- Cassells J.M., Yahya M.T., Gerba C.P. y Rose J.B. (1995). Efficacy of a combined system of copper and silver and free chlorine for inactivation of *Naegleria fowleri* amoebas in water. *Wat. Sci. Tech.* 31, 119-124.
- Colclasure R. (2001). Managing microbiological fouling potentials with a non-oxidizing biocide tablet in cooling tower systems. 62nd International Water Conference. IWC-01-12, Pittsburgh, PA., EUA.
- Comninellis C. (1994). Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. Section One. Water care and treatment processes, En *Environmental oriented electrochemistry*. (C.A.C. Sequira, Ed.). Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Court A. W., Grant D. y Callery A. G. (2000). Dosing liquid disinfection chemicals under vacuum: experiences from within the UK and USA water industry. 61st International Water Conference. IWC-00-13, Pittsburgh, PA. EUA.
- Dhar H.P., Bockris J.O'M. y Lewis D.H. (1981) Electrochemical inactivation of marine bacteria. *J. Electrochem. Soc.* 128, 229-234.
- Domek M.J., Lechevallier M.W., Cameron S. C. y McFeters G.A. (1984). Evidence for the role of copper in the injury process of coliform bacteria in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.* 48, 289-293.
- Domek M.J., Robbins J.E., Anderson M.E. y McFeters G.A. (1987). Metabolism of *Escherichia coli* injured by copper. *Can. J. Microbiol.* 33, 57-62.
- Eibl V. (1977). Electrolytic purification of aqueous liquids in the presence of silver ions. U. S. Pat. 4, 048, 032.
- Genders J. D. y Weinberg N. L. (Editores). (1992). *Electrochemistry for a cleaner environment*. Electrosynthesis Co. East Amherst, Nueva York. EUA.
- Green R. (1999). A report on CIM activities at TMI. International Water Conference. IWC-99-72. Pittsburgh, PA., EUA.
- Gump D. J. (2001). Utilization of ultra violet disinfection systems in industrial process. 62nd International Water Conference. IWC-01-13, Pittsburgh, PA., EUA.
- HACH Company. (1997). *Water analysis handbook*, Loveland, Colorado. EUA, pp. 335, 379 y 1111.
- IDEXX, 2000. Quanti-Tray/2000. INDEXX Laboratories, INC. US Patent Numbers 4.925,789; 5,429,933; 5,518892.
- Jolley R. L., Gorchev H. y Hamilton D. H. Jr. (1977). *Water chlorination environmental impact and health effects*. Vol. 2, Ann Arbor Science, Michigan, EUA.
- Jones R., Echols J. F., Freeman T. y Long M. (2000). Eliminating oxidizing biocides from condenser cooling water system. International Water Conference. IWC-00-10, Pittsburgh, PA., EUA.
- Just J. y Szniolis A. (1936). Germicidal properties of silver in water. *J. Am. Water Works Assoc.* 28, 492-506.
- Kutz S. M, Landeen L. K., Yahya M.T. y Gerba Ch.P. (1988). Microbiological evaluation of copper:silver disinfection units. Proceedings of the Conference on Progress in Clinical Disinfection. State University of New York, Binghamton, Nueva York, pp. 351-357.
- Landeen L. K., Yahya M. T. y Kutz S. M. (1989a). Microbiological evaluation of copper:silver disinfection of units for use in swimming pools. *Water. Sci. Tech.* 21, 267-270
- Landeen L.K., Yahya M.T. y Gerba Ch.P. (1989b). Efficacy of copper and silver ions and reduced levels of free chlorine in inactivation of *Legionella pneumophila*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55, 3045-3049.
- Licina G. J. y Nekoksa. G. (1997). Monitoring biofilm formation in a brackish water cooled power plant environment. *Corrosion/97*, Paper No. 222, NACE International, Houston, TX, EUA.
- Licina G. J., Willertz L. E., Swoyer B. M. y Tombaugh R. S. (1996). Monitoring corrosion and biofilm formation in the emergency service water system at Susquehanna. 9th EPRI Service Water Reliability Improvement Seminar, Daytona Beach, FL, EUA.
- Little B., Wagner P. y Mansfield F. (1991). Microbiologically influenced corrosion of metals and alloys. *International Materials Reviews* 36, 253-272.
- Lutey R. W. (2000). Microbiological control in process water systems: An overview. International Water Conference. IWC-00-1, Pittsburgh, PA. EUA.
- Lutey R. W. (2001). A review and comparison of CIM Indices (Models). International Water Conference. IWC-01-4, Pittsburgh, PA., EUA
- McCall E., Stout J. E. y Yu I. V. (1999). Efficacy of biocides against biofilm-associated *Legionella* in a model system. 60th International Water Conference. Paper 19, October 18-20, Pittsburgh, PA. EUA.
- Nakasono S., Nakamura N., Sode K. y Matsunaga T. (1992). Electrochemical disinfection of marine bacteria attached on a plastic electrode. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 27, 191-197
- Opheim D. y Lane J. (2001). Biological control in cooling towers treated with pulsed-power systems. 62nd International Water Conference. IWC-01-54, Pittsburgh, PA. EUA

- Ponta A. y Kulhanek A. (1986). Process for the electro-chemical decontamination of water polluted by pathogenic germs with peroxide formed in situ. U.S. Pat. 4,619,745
- Richards R. M. E. (1981). Antimicrobial action of silver nitrate. *Microbios* 31, 83-91.
- Rohr U., Weber S., Selenka F. y Wilhelm M. (2000). Impact of silver and copper on the survival of *Amoebae* and ciliated protozoa *in vitro*. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203, 87-93
- Shimada K. y Shimahara K. (1982). Responsibility of hydrogen peroxide for the lethality of resting *Escherichia coli* B cells exposed to alternating current in phosphate buffer solution. *Agric. Biol. Chem.* 46, 1329.
- Silva M. S. y Álvarez G. A. (2001a). Cooling water bacteria disinfection by using electrolytically generated silver and copper ions. *Proceedings of the 62nd International Water Conference*. Paper 53. October 21-25, Pittsburgh, PA., EUA.
- Silva M. S. y Álvarez G. A. (2001b). Estudio de una alternativa novedosa para sustitución del uso del cloro en sistemas de enfriamiento. *Informe Anual, Instituto de Investigaciones Eléctricas. IIE/44/11727/I001/P, México.*
- Silva M. S. Martínez M. E. y Álvarez G. A. (2002). Tecnología alternativa compatible con el ambiente para el tratamiento de aguas de enfriamiento: ionización de plata y cobre. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 18, 117-130.
- Silva M. S y Álvarez G. A. (1993). Industrial applications of Pitzer's equation to cooling water systems. *54th International Water Conference*. IWC-93-33 Pittsburgh, PA, EUA.
- Silva M. S y Álvarez G. A. (1994). Improvement of calcium sulfate scaling calculation in cooling water systems *55th International Water Conference*. IWC-94-62 Pittsburgh, PA., EUA.
- Thurman R.B. y Gerba Ch. P. (1989). The molecular mechanisms of copper and silver ion disinfection of bacteria and viruses. *Crit. Rev. Environ. Contr.* 18, 295-315.
- White G. C. (1992). *Handbook of chlorination and alternative disinfectants*. 3a ed., Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Woodward R. L. (1963). Review of the bactericidal effectiveness of silver. *J. Am. Water Works Assoc.*, 7, 881-886.
- Yahya M.T., Landeen L.K., Messina M.C., Kutz S. M., Schulze R. y Gerba Ch.P. (1990). Disinfection of bacteria in water systems by using electrolytically generated copper:silver and reduced levels of free chlorine. *Can. J. Microbiol.* 36, 109-116.