

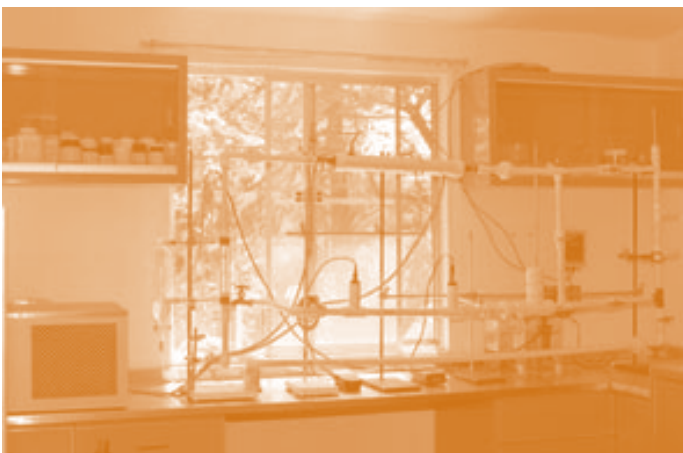
Factibilidad técnica para emplear iones plata y cobre electrogenerados en el control microbiológico de los sistemas de enfriamiento

Susana Silva M., Esteban Martínez M. y Alberto Álvarez G.

Introducción

Aun y cuando existen numerosos estudios que documentan cambios de metabolismo e inactividad de microorganismos debido al daño ocasionado por iones metálicos o halógenos, no existe un documento definitivo que ligue los cambios causados por los iones metálicos o halógenos a nivel molecular.

El objetivo de este trabajo es determinar la factibilidad técnica de sustituir el uso de cloro por otro biocida (ionización de plata o cobre) no peligroso en aguas de enfriamiento. Esta técnica de ionización podría ser empleada para tratar el agua de procesos industriales en general. El agua empleada provino del agua de repuesto del sistema de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Valle de México (CTEVM) y agua residual de las plantas de tratamiento del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Los tres tipos de agua empleados tienen características físicas, químicas y biológicas similares.



Materiales y métodos

Metodología experimental

- a) Prueba de jarras. Los reactores empleados para llevar a cabo las pruebas microbiológicas fueron de polietileno de alta densidad y de polipropileno. Se seleccionaron estos materiales debido a su capacidad de baja adsorción de iones plata y cobre. Los reactores se lavaron con una solución de ácido nítrico para eliminar los posibles iones metálicos adsorbidos en la superficie. Los reactores se llenaron con una solución de HNO_3 al 12% y se dejaron reposar durante la noche. Posteriormente se enjuagaron con agua destilada y se les agregó, a cada uno, un litro de la solución del ion biocida bajo estudio, a la concentración deseada, y se dejaron reposar durante 24 horas con el fin de acondicionarlos. Una vez acondicionados, se les agregaron 950 ml del agua bajo estudio (agua residual de la planta de tratamiento del IMTA o agua de repuesto de la CTEVM) a la temperatura de interés a cada uno completándose el volumen de 1000 ml con la solución del ion bajo estudio a la concentración determinada. Los reactores se colocaron en celdas alimentadas con agua del baño con recirculación para mantener la temperatura constante durante la duración de la prueba. Simultáneamente se corrió un reactor con el “experimento control” (EC), en ausencia del ion metálico, conteniendo 950 ml de agua residual aforándose a un litro con agua destilada. Se retiraron muestras de agua de cada reactor (incluyendo el EC) a diferentes intervalos de tiempo y se analizó el contenido de bacterias presentes. Una solución neutralizante de tiosulfato de sodio se adicionó a las muestras de agua inmediatamente después de ser retiradas de los reactores, esto con el fin de neutralizar cualquier efecto de los iones metálicos (Landeen, 1989). Las pruebas tuvieron una duración de 24 a 72 horas.

b) Sistema continuo. La experimentación se llevó a cabo en un sistema continuo parcialmente cerrado con capacidad de 20 litros de agua aproximadamente. En este sistema se controlaron el pH y la temperatura como variables importantes en forma similar a la operación de un sistema de enfriamiento. El pH se controló en el intervalo de $7 < \text{pH} < 8$ mediante la adición de ácido sulfúrico manteniéndose una temperatura de $27 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (delta de temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$) y un flujo de 1.8 gpm. El pH, la temperatura, el flujo y la conductividad se midieron en línea. El electrodo de pH y el conductímetro se calibraron cada 12 horas aproximadamente. El sistema continuo se alimentó con agua residual (planta de tratamiento del IIE) tratada mediante el proceso de lodos activados tomándose la muestra antes del punto de cloración. El sistema continuo se acondicionó durante 24 horas antes de iniciar la prueba microbiológica bajo estudio. El acondicionamiento consistió en recircular once litros de una solución del agente biocida (plata y cobre) a la concentración de interés para minimizar la adsorción del mismo en los componentes del sistema durante la prueba microbiológica. La solución del agente biocida se preparó con agua destilada. El volumen inicial de 11 litros empleado en cada prueba microbiológica no se mantuvo constante durante la prueba que duró 72 horas aproximadamente debido a la evaporación y al muestreo; sólo se adicionó un volumen variable de una solución de ácido sulfúrico diluido para mantener el pH. Se colectaron muestras de agua a diferentes intervalos de tiempo para analizar a las bacterias presentes en el agua.

Biocida empleado

Los sistemas de plata, cobre y plata/cobre fueron empleados como biocidas en las pruebas microbiológicas. La concentración de los agentes biocida se estableció con base en los valores reportados en la Tabla 1 (Just y Szniolis, 1936).

Electrogeneración de plata y cobre

La electrogeneración de iones de plata y cobre se llevó a cabo potenciales estáticamente (equipo AUTOLAB/PGSTAT 30 marca BRINKMAN) aplicando un voltaje de 7 a 10 voltios en un arreglo experimental de dos electrodos a temperatura ambiente. El electrodo de referencia se conectó a la terminal del contraelectrodo. El contraelectrodo empleado fue del mismo material del ion bajo estudio. La ionización se llevó a cabo en agua destilada y con frecuencia se empleó una solución de plata o cobre previamente electrogenerada. La concentración de los iones de plata y cobre se analizó espectrofotométricamente al término de la ionización. Los electrodos de plata y cobre se fabricaron empleando láminas de plata (99% de pureza) y láminas de cobre (100% de pureza) de 1mm de espesor. Las láminas metálicas se adquirieron en un taller de la ciudad de Taxco, Guerrero. El área de los electrodos fue de 20 a 30 cm^2 aproximadamente. Los electrodos se pulieron con lija de agua fina (No. 500), se secaron con papel absorbente y se conectaron a la celda para ser empleados.

Análisis químicos

La concentración de plata y cobre se analizó con el espectrofotómetro DRL/2010 marca HACH, el pH y la conductividad se midieron con un medidor de pH y un conductímetro marca HACH respectivamente.



Análisis bacteriológicos

Bacterias Coliformes. Las bacterias coliformes se cuantificaron empleando un *kit* de Pruebas Colilert (IDEXX, 2000). El *kit* de pruebas colilert permite la detección y confirmación simultánea de coliformes totales y *E. Coli* (coliformes fecales) en agua. Las pruebas Colilert consisten en la determinación del número más probable de coliformes por 100 ml (NMP/ 100 ml). El reactivo colilert se adiciona a 100 mL de muestra de agua contenida en un recipiente esterilizado (frasco lechero). Una vez disuelto el reactivo, se agrega la mezcla de reactivo y muestra a un dispositivo Quanti-Tray/2000, sellando el dispositivo en el sellador (Quanti-Tray Sealer) y se incuba por 24 horas a 35 °C. Posteriormente se cuenta el número de celdas positivas y con la tabla de NMP, junto con el *kit*, se determina el número más probable de bacterias coliformes. Las bacterias coliformes totales desarrollan celdas amarillas y las bacterias coliformes fecales desarrollan celdas que fluorescen con luz ultravioleta.

Bacterias relacionadas con hierro (IRB) y bacterias sulfato reductoras (SRB). Las bacterias IRB y SRB se determinaron empleando las pruebas de reacción de la actividad biológica BART-Test (BART% 2000). Estas pruebas detectan la actividad (agresividad) de las bacterias presentes en el agua con base en el tiempo, T_L , que tarda en aparecer la primera reacción desde el inicio de la prueba. Entre mayor sea el T_L antes de observar la primera reacción, menos agresivas son las bacterias en la muestra en particular. Una población mayor de 1000 unidades formadoras de colonias por mililitro (ufc/ml) se considera como altamente agresiva reflejando su agresividad en la formación de la biopelícula en los intercambios

biadores de calor y, en general, en los componentes del sistema de enfriamiento, esto como consecuencia el posible desarrollo de corrosión microbiana. Una agresividad media está relacionada con una población de 1000 a 100 ufc/ml mientras que una agresividad baja se presenta en poblaciones de 10 ufc/ml, o menor. Las reacciones se relacionan con la manera en la cual los microbios interactúan dentro del ambiente de las pruebas BART. Estas reacciones pueden ser cambios de color, desarrollo de gas y precipitación. La naturaleza única de las pruebas BART, que la hace diferente y posiblemente superior a las técnicas de cultivo en agar, es que el agua usada en la prueba proviene completamente de la muestra y aún contiene los microbios en su hábitat natural. Los métodos de cultivo de agar, proveen superficies de agar a los microbios para que éstos crezcan creando así un ambiente no apto para muchos microbios. De esta manera los posibles resultados son: no creció, no aparece o no se puede contar. Las pruebas BART contienen nutrientes selectivos para que grupos específicos de microbios se desarrollen y exhiban su actividad biológica mediante las reacciones descritas anteriormente y consisten en la adición, aseptica, de 15 ml de la muestra de agua sin diluir a la prueba BART. Observar la prueba diariamente durante ocho días registrando los códigos de reacción correspondientes a las reacciones desarrolladas para cada tipo de prueba (IRB y SRB). Se colectaron muestras de agua cada 24, 48 y 72 horas para llevar a cabo dichas pruebas.

Efectividad del tratamiento

La efectividad del tratamiento con los iones metálicos se evaluó empleando el tiempo que tarda en aparecer la primera reacción. Este tiempo es representado por T_{LD} . El T_{LD} , medido comúnmente en días de retardo, indica la agresividad del consorcio bacteriano que se está estudiando. Los tiempos de retardo para diferentes grados de agresividad son diferentes para cada prueba BART y cada consorcio bacteriano. Como resultado de esto, la diferencia en el tiempo de retardo antes y después del tratamiento puede ser usado para determinar la efectividad del tratamiento. Lo anterior se expresa por la ecuación

$$T_{LD} = T_{LAT} - T_{LBT}$$

Donde T_{LD} es la diferencia de tiempo creada por el tratamiento expresado en días. Esto reflejaría el desplazamiento del logaritmo de la población como resultado del tratamiento, T_{LAT} representa los días que tarda en aparecer la primera reacción después del tratamiento y T_{LBT} representa los días que tarda en aparecer la primera reacción antes del tratamiento. Un valor negativo de T_{LD} significa no solo que el tratamiento ha sido inefectivo sino que también ha habido una liberación de bacterias (de la biopelícula hacia el agua) que confiere mayor agresividad a las bacterias. Si el T_{LD} se encuentra en el intervalo de $-0.1 a + 0.1$ entonces el tratamiento podría ser considerado que no tuvo un significativo impacto sobre el consorcio bacteriano que se está estudiando empleando las pruebas BART. Un impacto significativo en el tratamiento resultaría en un valor de T_{LD} mayor de 0.9. La efectividad del tratamiento se obtuvo mediante el cálculo de T_{LD} y con base en la Tabla 2.

Resultados

Los sistemas metálicos estudiados en el establecimiento del control microbiológico en el agua residual y agua de repuesto son plata, plata/cobre y cobre en los intervalos de concentración de 200 mg/L a 3000 mg/L de plata y de 200 mg/L a 1200 mg/L de cobre. Los experimentos realizados en la prueba de jarras (sistema cerrado) se llevaron a cabo a dos temperaturas ($25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y $32^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) sin controlar el pH; mientras que en el sistema continuo el pH se mantuvo en el intervalo de pH de 7 a 8 mediante la adición de ácido sulfúrico y se conservó un delta de temperatura de 10°C ($27^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). El pH, la conductividad y la temperatura se midieron en forma continua.

Electrogeneración de iones metálicos

La eficiencia de electrogeneración de los iones metálicos de plata y cobre depende de la calidad (concentración y composición química) del agua empleada y del grado de pureza de la superficie metálica del ion por electrogenerar. En este estudio se realizaron pruebas de electrogeneración de iones plata empleando agua de la llave, agua destilada con electrólito de fondo (NaNO_3 y Na_2SO_4) y agua destilada. El agua destilada fue el agua que mejor calidad y producción de plata originó, debido a que los otros tipos de agua probados formaban precipitados con el ion plata (AgCl , AgSO_4 , etc.), disminuyendo así la cantidad de plata libre en el agua para ser empleada en el abatimiento de la carga bacteriana en las pruebas microbiológicas. Se procedió de la misma manera para electrogenerar los iones de cobre empleando agua destilada, con el fin de eliminar posibles problemas de formación de precipitados del cobre con los aniones presentes en agua no destilada. La cantidad de iones electrogenerados (concentración) puede ser conocida teóricamente mediante una relación matemática muy simple (Bard and Faulkner, 1980; Southampton Electrochemistry Group, 1993). Sin embargo, por las razones antes expuestas, se consideró importante partir de concentraciones conocidas experimentalmente. Just y Szniolis (Just y Szniolis, 1936) reportaron que la composición mineral del agua influye enormemente en el consumo de la corriente eléctrica durante la generación de los iones resultando en una eficiencia de generación de iones plata en aproximadamente del 50%.

Es importante mencionar que los iones cobre son interferentes para determinar la concentración de plata cuando se electrogenera usando a la aleación cobre/plata como superficie metálica. Con base en esta observación, en las pruebas microbiológicas llevadas a cabo con el sistema plata/cobre, se procedió a: generar los iones metálicos por separado, determinar su concentración experimentalmente y preparar la mezcla plata/cobre a la concentración deseada para la prueba.

Bacterias coliformes

Las bacterias coliformes (totales y fecales) se cuantificaron en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IMTA en los sistemas de plata, cobre y plata/cobre usando plata y cobre electrogenerados en la prueba de jarras. Así pues, se emplearon reactivos químicos de nitrato de plata y cloruro de cobre manteniendo las mismas relaciones plata/cobre con la finalidad de comparar el

impacto de los iones provenientes de reactivos químicos con respecto a los electrogenerados en el aniquilamiento de las bacterias. Se observó que el sistema plata es capaz de inactivar las bacterias coliformes resultando en un aniquilamiento de alrededor del 90% en los primeros 30 minutos de contacto a las concentraciones de plata empleadas. Un valor promedio inicial de coliformes fecales de 10^9 NMP/100 ml se redujo a 10^3 NMP/100 ml en las primeras seis horas de contacto aproximadamente empleando 600 $\mu\text{g/L}$ de plata. El sistema cobre mostró una inactivación de las bacterias coliformes resultando en un aniquilamiento de alrededor del 90% después de cinco horas de contacto a las concentraciones de cobre empleadas permaneciendo en ese valor hasta alrededor de las 30 horas. Después de ese tiempo, las bacterias coliformes adquirieron valores similares a los del experimento control. El experimento control representa el comportamiento de las bacterias coliformes en ausencia de iones metálicos. En el sistema plata/cobre en donde se mantiene constante la concentración de la plata en 600 $\mu\text{g/L}$ y se varía la concentración de cobre en las relaciones plata/cobre estudiadas, se encontró un comportamiento similar al reportado en el sistema plata excepto que no se observó recrecimiento de las bacterias coliformes. Después de cinco horas de contacto, este sistema reportó un aniquilamiento total de las bacterias coliformes. Los iones provenientes de los reactivos químicos tuvieron un comportamiento similar a los sistemas plata y cobre mostrando recrecimiento de las bacterias coliformes después de 15 horas de contacto adquiriendo valores de 10^3 NMP/100 mL aproximadamente. Es importante mencionar que los valores de las bacterias coliformes fueron similares a los obtenidos con muestras en ausencia y presencia de la solución neutralizante.

Los sistemas de plata y plata/

cobre estudiados en el abatimiento de bacterias coliformes en el sistema continuo se llevaron a cabo para observar el efecto del pH (controlado con adición de ácido sulfúrico), el delta de temperatura de 10 °C aproximadamente, el flujo y observar tanto el efecto de la concentración de sales debido a la evaporación como el impacto de las condiciones sépticas sobre el comportamiento del agente biocida y las bacterias presentes en el agua. Se empleó agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IIE y se midió el pH, la conductividad y la temperatura en forma continua manteniéndose constante el flujo. Estos sistemas lograron inactivar a las bacterias coliformes resultando en un aniquilamiento de coliformes totales y fecales del 99% en las primeras dos horas de contacto. El sistema 600µgL⁻¹ plata/1200µgL⁻¹ cobre, fue el sistema que mostró recrecimiento por debajo de 100 NMP/100 ml de coliformes to-

tales y por debajo de 10 NMP/100 ml de coliformes fecales. En el resto de los sistemas las coliformes totales y fecales mostraron recrecimiento alcanzando valores máximos de 1000 NMP/100 ml excepto por el sistema 600µgL⁻¹ plata/600µgL⁻¹ cobre, cuyos valores fueron de hasta 10⁴ NMP/100 ml. Los recrecimientos de las bacterias coliformes fueron observados entre las primeras 10 y 15 horas de contacto. La Figura 1 muestra dos gráficas del número más probable de coliformes totales y fecales en función del tiempo para los sistemas de 600µgL⁻¹ plata/600µgL⁻¹ cobre y 600µgL⁻¹ plata/1200µgL⁻¹ cobre. La línea punteada marca el máximo valor permisible de coliformes fecales en la descarga establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-1996/ NOM-003-ECOL-1997).

Las bacterias coliformes se analizaron en el agua de repuesto al sistema de enfriamiento de la CTEVM como una medida de control mientras se estudiaban las bacterias relacionadas con fierro y bacterias sulfato reductoras en los experimentos sucesivos.

Bacterias IRB y SRB

La Figura 2 muestra una gráfica de la población probable de bacterias relacionadas con fierro en función de la concentración de plata. La muestra es agua de repuesto del sistema de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Valle de México a temperatura constante (32 °C ± 0.5 °C) sin control del pH. Esta gráfica muestra que el intervalo óptimo de concentraciones de plata es de 0.6 a 3.0 mg/L en donde se logró abatir más del 90% de las poblaciones bacterianas relacionadas con fierro. Las muestras permanecieron 48 horas en contacto con la respectiva

Figura 1. Efecto de los iones plata/cobre sobre el aniquilamiento de bacterias coliformes totales y coliformes fecales. Experimento realizado en sistema continuo usando agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IIE a pH entre 7.2 y 7.8 y temperatura de 27 °C ± 5 °C.

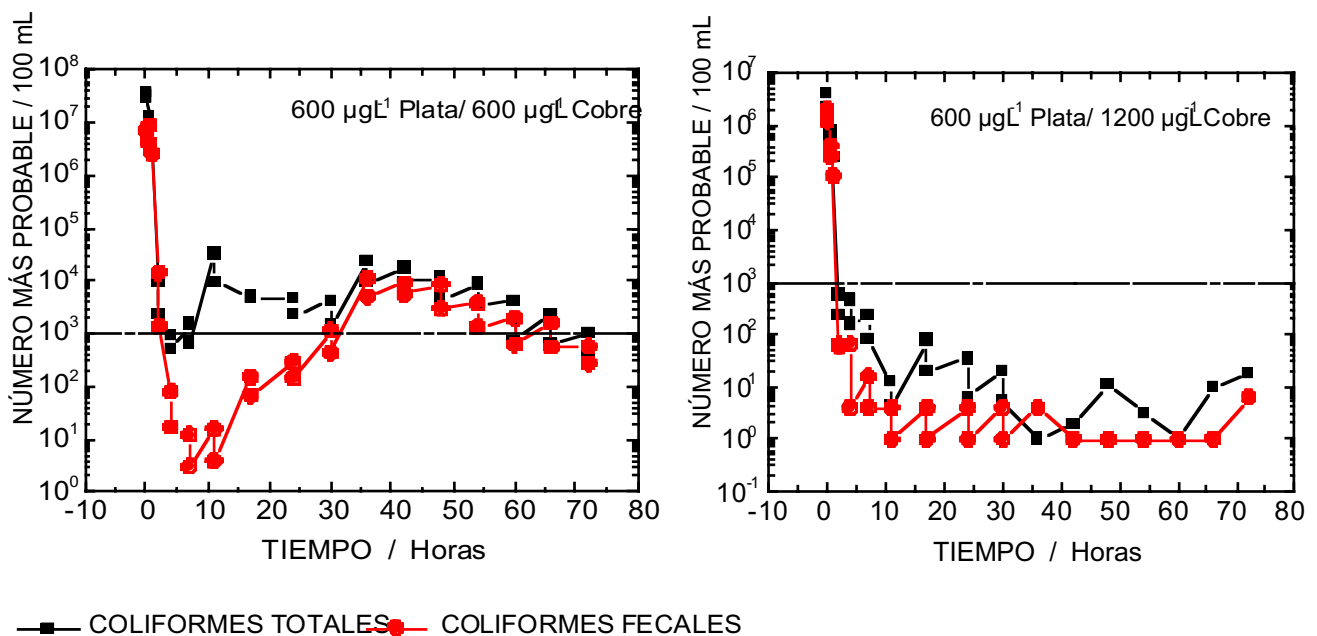


Figura 2. Efecto de la concentración del ion metálico plata sobre el aniquilamiento de bacterias relacionadas con fierro. Experimento realizado en prueba de jarras usando agua de repuesto del sistema de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Valle de México a temperatura constante (32 °C).

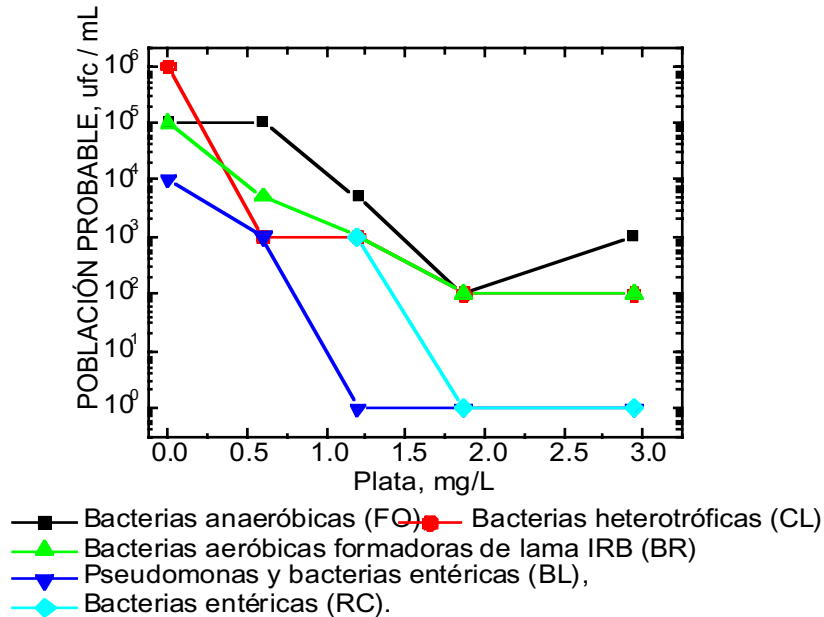
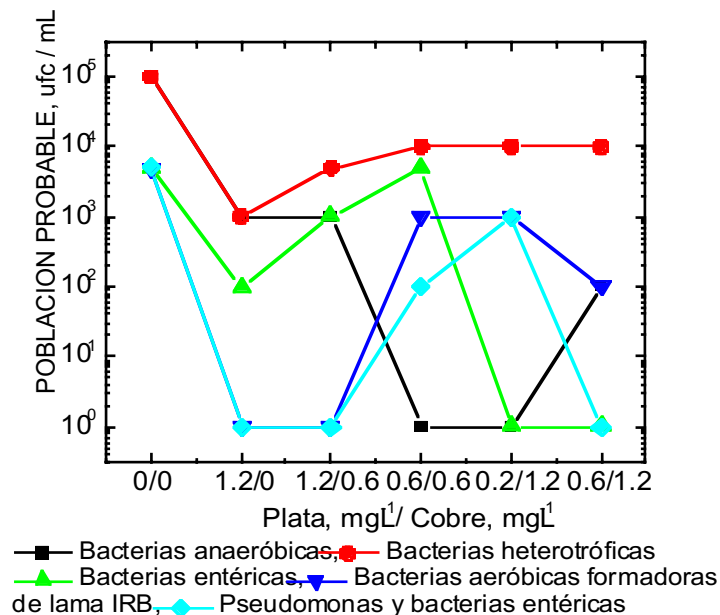


Figura 3. Efecto de las relaciones de concentración de plata/cobre sobre las bacterias relacionadas con fierro presentes en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IIE. Tiempo de contacto de los iones metálicos con el agua: 48 horas. El pH se mantuvo entre $7.2 < \text{pH} < 7.8$ con adición de ácido sulfúrico y temperatura constante de 27 ± 5 °C en el sistema continuo.



concentración de plata antes de proceder con el análisis de IRB-BART.

Las Figuras 3 y 4 presentan la variación de la población probable de IRB y SRB presentes en el agua residual de la planta de tratamiento del IIE en función de la relación de concentraciones de plata/cobre respectivamente. Las muestras permanecieron 48 horas en contacto con las respectivas relaciones plata/cobre. La relación 1.2 mgL^{-1} plata/ 0 mgL^{-1} cobre (ver Figura 3) es la relación más eficiente para inactivar a las bacterias relacionadas con fierro con un aniquilamiento del 99% y mayor. Las bacterias heterotróficas se abatieron en un 90% en el resto de las relaciones plata/cobre estudiadas. La relación 0.6 mgL^{-1} plata/ 1.2 mgL^{-1} cobre logró inactivar a las IRB con un aniquilamiento igual o mayor al 99%, exceptuando a las bacterias heterotróficas. Esta misma relación (ver Figura 4) resultó ser muy efectiva en la inactivación total de las bacterias sulfato reductoras con un aniquilamiento del 100 % de SRB.

Efecto del control del pH, evaporación y delta de temperatura

No se observó un apreciable impacto de la concentración de las sales debido a la evaporación, control del pH y el delta de temperatura estudiado sobre el aniquilamiento de las poblaciones bacterianas empleando los iones plata y cobre.

Efectividad del tratamiento

Los resultados de la efectividad del tratamiento con los iones metálicos se reportan en las Tablas 3 y 4 para las bacterias relacionadas con fierro y bacterias sulfato reductoras respectivamente. Estos resultados se obtuvieron después de haber estado la plata y las relaciones de plata/cobre en contac-

to durante 48 horas con las bacterias presentes en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IIE en el sistema continuo. La Tabla 5 muestra los resultados de la efectividad del tratamiento de los iones metálicos de las pruebas IRB-BART y SRB-BART realizadas en la prueba de jarras usando agua de repuesto del sistema de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Valle de México.

Conclusiones

Los sistemas de plata, plata/cobre y cobre estudiados resultaron ser una buena alternativa con un mínimo impacto ambiental para sustituir el cloro en los sistemas de enfriamiento. Estos sistemas lograron abatir a las poblaciones bacterianas promotoras de la corrosión influenciada microbiológicamente y del ensuciamiento biológico a niveles de 1000 ufc/mL y menores compitiendo con los tratamientos de aguas de enfriamiento convencionales. Así mismo, la capacidad de adherencia de la biopelícula sobre las superficies del sistema de enfriamiento se vería seriamente afectada debido a que la plata se adsorbe a la superficie que la contiene y aún continua su efecto bactericida (Thurman y Gerba, 1989). Adicionalmente, las bacterias coliformes son reducidas por debajo de los niveles aceptados por la Norma Oficial Mexicana.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización del presente trabajo de investigación (adquisición de equipo de inversión y complemento de beca de tres estudiantes de maestría).

Susana Silva Martínez

Ingeniería Industrial en Química por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (1983), maestra en

Figura 4. Efecto de las relaciones de concentración de plata/cobre sobre las bacterias sulfato reductoras presentes en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IIE. Tiempo de contacto de los iones metálicos con el agua: 48 horas. El pH se mantuvo entre $7.2 < \text{pH} < 7.8$ con adición de ácido sulfúrico y temperatura constante de $27 \pm 5^\circ\text{C}$ en el sistema continuo.

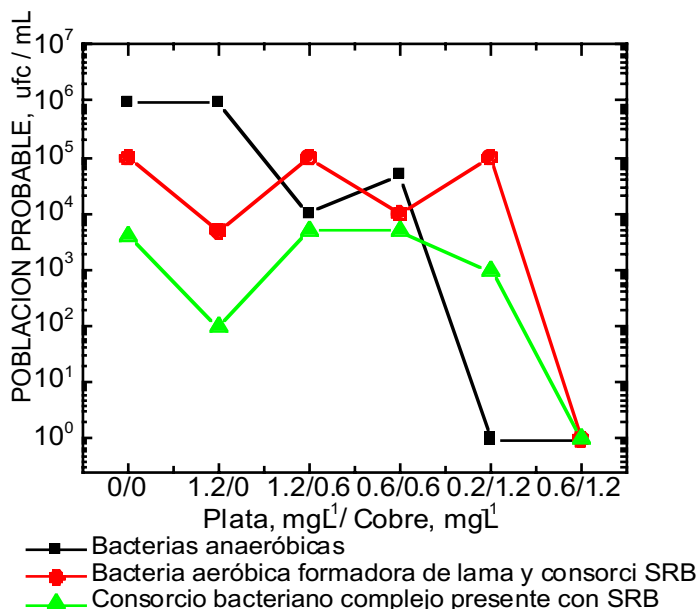


Tabla 1. Plata requerida para desinfección de diferentes calidades de agua

Tipos de agua	Concentración de plata, $\mu\text{g/L}$
Agua potable y agua mineral	25 - 100
Agua de albercas	150 - 200
Agua para hacer hielo artificial	400
Agua para lavar vajillas y utensilios de fábricas preparadoras de alimentos	25 - 600.

Tabla 2. Evaluación del tratamiento.

Intervalo de T_{LD}	Efectividad del Tratamiento
> -1.0	El tratamiento falló y las bacterias se han vuelto más agresivas en el agua.
-0.9 a -0.1	El tratamiento falló en reducir la carga microbiana en el agua.
-0.1 a $+0.1$	Tratamiento no efectivo.
$+0.2$ a $+0.9$	Tratamiento marginalmente efectivo.
$+1.0$ a $+2.9$	Tratamiento efectivo sin embargo es probable que el bioensuciamiento se inicie otra vez.
$> +3.0$	Tratamiento muy efectivo con un $> 99.9\%$ control.

Tabla 3. Efectividad del tratamiento usando el sistema de plata/cobre en agua residual.

plata/cobre mgL ⁻¹ /mgL ⁻¹	Bacterias Relacionadas con Fierro				
	Bacterias Anaerobias (TL _D / Días)	Bacterias Entericas (TL _D / Días)	Bacterias Heterotróficas (TL _D / Días)	Bacterias Aerobias formadoras de lama IRB (TL _D / Días)	Pseudomonas y Entericas (TL _D / Días)
1.2/0.0	3	3	3	5	3
1.2/0.6	3	1	1	4	1
0.6/0.6	6	0	1	0	0
0.2/1.2	4	0	0	0	0
0.6/1.2	3	2	-1	2	2

Tabla 4. Efectividad del tratamiento usando el sistema de plata/cobre en agua residual.

plata/cobre mgL ⁻¹ /mgL ⁻¹	Bacterias Sulfato Reductoras		
	Bacterias Anaerobias (TL _D / Días)	Bacterias Aerobias formadoras de la- ma y consorcio de SRB (TL _D / Días)	Consorcio Bacteriano complejo presente con SRB (TL _D / Días)
1.2/0.0	-1	2	2
1.2/0.6	-2	0	1
0.6/0.6	-2	2	0
0.2/1.2	4	0	3
0.6/1.2	2	6	2

Intervalo de*TL_D Efectividad del Tratamiento

> -1.0 El tratamiento falló y la bacteria se volvió más agresiva en el agua

-0.1 a +0.1 Tratamiento no efectivo

+1.0 a +2.9 El tratamiento aplicado es efectivo, sin embargo es probable que el ensuciamiento biológico inicie otra vez

> +3.0 Tratamiento muy efectivo con > 99.9% de control

*TL_D = Diferencia de tiempo creada por el tratamiento expresada en días. Condiciones experimentales: Tiempo de contacto 48 h, 7.2 < pH < 7.8, temperatura 27 ± 5°C**Tabla 5.** Evaluación del tratamiento del agua de enfriamiento de la Central Termoeléctrica de Valle de México.

Población Bacteriana	T _{LD} / días	Efectividad del tratamiento
Muestras colectadas para las pruebas IRB-BART y SRB-BART después de la adición de: 1196 mgL ⁻¹ Ag/ 0 mgL ⁻¹ Cu	1196 mgL ⁻¹ Ag/ 600 mgL ⁻¹ Cu	
Bacteria anaeróbica (IRB)	2	3
Bacterias heterotróficas (IRB)	3	5
Bacterias aeróbicas formadoras de lama IRB	3	3
Bacterias anaeróbicas (SRB)	1	1
Consorcio bacteriano complejo presente con SRB	1	-

T_{LD} = Diferencia de tiempo creada por el tratamiento expresado en días.

Muestras colectadas a las 48 horas de contacto del ion metálico y agua.

Ciencias Químicas con especialidad en Química Analítica por la UNAM (1989) y doctora en Química con especialidad en Electroquímica por la Universidad de Southampton, Inglaterra (1997). Ingresó al IIE en 1984. Para su campo desarrolla infraestructura teorica-experimental para evaluar la factibilidad técnica de sustituir el cloro por otro biocida en el establecimiento del control microbiológico en agua de los sistemas de enfriamiento de Centrales Termoeléctricas. Actualmente es Investigador Nacional del SNI.

ssilva@iie.org.mx

Esteban Martínez Meza

Ingeniero Industrial Químico, egresado del Instituto Tecnológico de Durango (1985). Cursa su maestría en Ingeniería Ambiental en la UNAM, actualmente se encuentra en la etapa de redacción de su te-

sis: "Estudio de una Alternativa Novedosa para la Sustitución del Uso del Cloro en Sistemas de Enfriamiento". Ha trabajado en la elaboración de reactivos químicos en la Industria de Reactivos Químicos de México, S.A. de C.V. y en el Grupo Roche-Syntex de México.

Alberto Álvarez Gallegos

Egresó de la Universidad Michoacana como ingeniero químico (1979). Cursó una especialidad en Química Analítica en la Universidad de Paris VI (1982). Doctor en Electroquímica por la Universidad de Southampton Inglaterra (1998). Desde su ingreso al IIE en 1985, su campo de trabajo está enfocado a la química del agua en procesos industriales y a la oxidación de contaminantes orgánicos en efluentes industriales. Actualmente es miembro del SNI.

aalvarez@iie.org.mx

Referencias

- Bard, A. J. and L. R. Faulkner. *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane and Toronto, 1980, p.19.
- BART%o (<http://www.dbi.sk.ca/droycon/BARTs.html>).
- Chang, S.L. "Modern concept of disinfection", in Proc. Natl. Special Conf. Disinfection, American Society of Civil Engineers, New York, 635,1970.
- Domek M.J., Robbins J.E., Anderson M.E., and McFeters G.A., *Metabolism of Escherichia Coli Injured by Copper*, Canadian Journal of Microbiology 1987, 33, pp. 57-62.
- Gardiner, R.E. Hobbs, N. J. and Jeffery, J. *Hydrogen peroxide a real alternative to chlorine in water treatment*, Water chlorination, Jolly, R. L. Ed. Ann Arbor Science Pub., 1983.
- Hamilton G. J. *Water Chlorination Environmental Impact and Health Effects*, vol.2, Ann Arbor Science. Publishers INC., 1977.
- IDEXX, 2000. Quanti-Tray/2000. IDEXX Laboratories, INC. US Patent Numbers 4,925,789; 5,429,933; 5,518892.
- Just, J., and A. Szniolis. *Germicidal properties of silver in water*, J. Am. Water Works Assoc., 28, 492, 1936.
- Kutz S. M, Landeen L. K, Yahya M.T, Gerba Ch.P. *Microbiological evaluation of copper:silver disinfection units*, Proceedings of the Conference on Progress in Clinical Disinfection. State University of New York, Binghamton New York, 1988.
- Landeen L. K, Yahya M. T., Kutz S. M. *Microbiological evaluation of copper:silver disinfection of units for use in swimming pools*, Wat. Sci. Tech., vol. 21, no.3,1989, pp. 267-270.
- Landeen L.K., Yahya M.T. and Gerba Ch.P. *Efficacy of Copper and Silver Ions and Reduced Levels of Free Chlorine in Inactivation of Legionella Pneumophila*, Applied and Environmental Microbiology, 55, 1989, pp. 3045-3050.
- LeChevallier, M. W. *Coliform regrowth in drinking water: a review*, J. Amer. Wat. Works Assoc. 82, 11, 74, 1990.
- Lund, E. *The significance of oxidation in chemical inactivation of poliovirus*, Arch. Ges. Virusforsch., 12, 648 1963.
- Normas Oficiales Mexicanas para la Protección Ambiental. Norma Oficial NOM-001-ECOL-1996 y NOM-003-ECOL-1997.
- Park, G. A. *Adsorption in the marine environment*, in *Chemical Ocean*, vol. 1, Riley, J.P. and Skirrow, G., Eds., Academic Press, New York, 1976, p. 241.
- Peterwig, H.G. *Pharmacology and toxicology of heavy metals: silver*, Pharmacol. Ther., 1,127,1976.
- Richards R. M. E., *Antimicrobial action of silver nitrate*, Microbios 31, 1981, pp. 83-91.
- Sletten, O. *Halogen and their role in disinfection*, J. Am. Water Works Assoc. December, 1974, p. 690,.
- Southampton Electrochemistry Group, *Instrumental Methods in Electrochemistry*, University of Southampton, Ellis Horwood Limited, Chichester, West Sussex, England, p. 18, 1993.
- Thurman R.B., and Gerba Ch. P. *The Molecular Mechanisms of Copper and Silver ion Disinfection of Bacteria and Viruses*, Critical Reviews in Environmental Control, 1989, vol. 18, issue 4, pp. 295-315.
- Tilton, R.C. and Rosenberg, B. Reversal of the silver inhibition of microorganisms by agar. *Appl. Environ. Microbiol.*, 35, 1116, 1978.
- White C., *Handbook of Chlorination and alternative disinfectants*. Third Edition, 1992.
- Woodward, R. L. *Review of the bactericidal effectiveness of silver*, J. Am. Water Works Assoc., July, 881, 1963.
- Yahya M.T, Landeen L.K., Messina M.C., Kutz S. M., Schulze R. and Gerba Ch.P. *Disinfection of bacteria in water systems by using electrolytically generated copper:silver and reduced levels of free chlorine*, Canadian Journal of Microbiology, 36, 1990, pp. 109-116.