

Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control

Cristina De Sousa, Angelina Correia & María Cristina Colmenares

La presente revisión tuvo como propósito analizar las estrategias para el control de la contaminación debida a la formación de la corrosión e incrustaciones, 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. Los sistemas de distribución pueden afectar la calidad del agua potable debido a las condiciones de la tubería y a la operación del sistema. La corrosión, las incrustaciones y los depósitos en la red de distribución, son otros de los problemas con mayor importancia en la industria del agua potable; esto puede afectar a la salud, la aceptación pública del suministro de agua y el costo de proveer un agua digna de confianza. Se concluye y se recomienda que como estrategias para controlar la corrosión y la formación de incrustaciones se deben seleccionar apropiadamente los materiales y el diseño del sistema, realizar el tratamiento químico adecuado (ajuste de pH, alcalinidad, oxígeno, uso de inhibidores de corrosión) y usar revestimientos y pinturas resistentes a la corrosión para proteger las paredes de las tuberías.

Palabras clave: Red de distribución, agua potable, corrosión, incrustaciones.

INTRODUCCIÓN

Las empresas que prestan el servicio de agua potable son conscientes de la variación que puede sufrir la calidad del agua luego de abandonar la planta de tratamiento, principalmente ocasionado por las condiciones físicas del sistema de distribución debido al tiempo de funcionamiento de la infraestructura y las condiciones de operación (Ríos *et al.*, 2008). Uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es el de la corrosión en los materiales metálicos, produciéndose perforaciones y obstrucciones de las líneas de agua. También, las estructuras de concreto son susceptibles de sufrir agresiones por mecanismos fisicoquímicos y biológicos donde la corrosión es el elemento de ataque destructivo (Mora & Cedeño, 2006).

Los productos de la corrosión y la acumulación de sedimentos en los sistemas de distribución pueden

proteger a los microorganismos de los desinfectantes. Estos organismos pueden reproducirse y causar problemas tales como mal sabor y olor, limos y corrosión adicional, lo cual trae como consecuencia que el agua que llega al consumidor no esté apta para su consumo. Los problemas de la calidad del agua asociados con la acumulación de sedimentos incluyen el aumento de la demanda de desinfectante, crecimiento microbiano, incremento de la turbidez en el agua, entre otros (AWWA, 2002).

Todas las aguas son corrosivas en cierto grado. La tendencia corrosiva del agua dependerá de sus características químicas y físicas. También, es importante, la naturaleza del material con el cual el agua entra en contacto. Los inhibidores añadidos al agua pueden proteger un material particular, y ser perjudicial para otros. Las interacciones químicas y físicas entre los materiales de la tubería y el agua pueden causar corrosión. Los desarrollos biológicos en un sistema de distribución también originan corrosión al proveer un ambiente donde pueden ocurrir interacciones físicas y químicas. Los mecanismos reales de la corrosión en

Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia - Edo. Carabobo, Venezuela.

*Autor de correspondencia: cristydsousa@hotmail.com

un sistema de distribución de agua son usualmente una combinación interrelacionada y compleja de los procesos biológicos, físicos y químicos. Ellos dependen en gran parte de los materiales en sí y de las propiedades químicas del agua (Letterman, 2001).

Trujillo *et al.* (2008), también señalan que la infraestructura hidráulica de distribución de agua para consumo humano suele sufrir importantes problemas de incrustación o corrosión interna y/o externa. La corrosión interna provoca el deterioro de la calidad del agua debido a los productos y contaminantes que se generan, disminuye el desempeño hidráulico y aumenta los costos de distribución y de mantenimiento de la red; en casos extremos, parte de la infraestructura queda inhabilitada temporalmente y por ende, se suspende el servicio. Los fenómenos de corrosión y de incrustación, también están relacionados directamente con la velocidad del agua y el tiempo de retención hidráulico. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión.

Una vez que se ha determinado la presencia de aguas agresivas o incrustantes, su control requiere la elección de materiales adecuados, un buen programa de monitoreo y mantenimiento, y la modificación de las características químicas del agua. Cuando se trata de adecuar la calidad del agua, el ajuste del pH y la alcalinidad representan los métodos más comunes, simples y económicos para controlar la corrosión e incrustación, destacando la eliminación de dióxido de carbono por aireación o el uso de NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 o NaHCO_3 . La adición al agua de un álcali como el hidróxido de calcio o de carbonato de calcio, la equilibra de manera inocua, estabilizando el pH ácido causante de la corrosión; desde el punto de vista económico, este método de solución es muy bajo comparado con los costos generados por la rehabilitación de las redes de distribución, además es de fácil aplicación. Para poder establecer los programas de control y los tratamientos adecuados para abatir la corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución, es importante caracterizar cualitativa y cuantitativamente el agua; para lo cual se considera el uso de los índices: de saturación Langelier, de estabilidad de Ryznar, de corrosión de Riddick, Relación Larson, entre otros (Trujillo *et al.*, 2008).

Es importante conocer los factores que afectan el deterioro físico de los sistemas de distribución de

agua potable, y su influencia sobre la calidad del agua suministrada al consumidor, con el objetivo de controlar la corrosión y formación de incrustaciones en la red, y así 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.

Cabe señalar que la Constitución Bolivariana de Venezuela (Gaceta Oficial N° 5.453, 2000). Título III. *De los Deberes, Derechos Humanos y Garantías. Capítulo V. De los Derechos Sociales y de las Familias*, 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 LAS INCRUSTACIONES

La protección de las tuberías contra la formación de incrustaciones se lleva a cabo confiriéndole al agua un carácter ligeramente incrustante, de manera de formar una película aislante sobre las paredes, pero limitando el fenómeno a fin de evitar una obstrucción de los tubos y la alteración de la presión y funcionamiento de la red de agua potable. Para determinar el carácter agresivo o incrustante del agua en función de la temperatura, pH, dureza, alcalinidad y sólidos disueltos, se ha propuesto un cierto número de índices, siendo el más utilizado el

índice de Langelier (IL). A través de este índice se define la agresividad del agua con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3). El índice de Langelier está basado en el efecto del pH sobre el equilibrio de solubilidad del CaCO_3 . El pH, al cual el agua está saturada con CaCO_3 , es conocido como pH de saturación (pH_s). Langelier define un índice (I_L) igual a la diferencia entre el valor medido del pH del agua y el del pH de saturación:

$$I_L = \text{pH} - \text{pH}_s \quad \text{Ec-1}$$

$$\text{pH}_s = 11,017 + 0,197 \log(\text{SDT}) - 0,995 \log(\text{Ca}^{+2}_T) - 0,016 \log(\text{Mg}^{+2}_T) - 1,041 \log(\text{Alcalinidad}_T) + 0,021 \log(\text{SO}^{2-}_4)_T \quad \text{Ec-2}$$

donde: SDT: Sólidos Disueltos Totales, “T” denota la concentración analítica total en mg/L

Si $I_L > 0$, el agua está sobresaturada, el CaCO_3 se deposita, por lo tanto el agua es incrustante.

Si $I_L = 0$, el agua está saturada (en equilibrio) con CaCO_3 , éste ni se precipita ni se disuelve.

Si $I_L < 0$, el agua está insaturada, el CaCO_3 tiende a disolverse por lo tanto el agua es agresiva (Varo Galvañ *et al.*, 2004).

Aunque el I_L tiende a predecir si el CaCO_3 precipitará o se disolverá, éste no indica que cantidad de la sal precipitará o si su estructura proporcionará resistencia a la corrosión, solo permite determinar la estabilidad y el pH óptimo de un agua. En función de su valor se deben agregar químicos para estabilizar el agua ajustando el pH. El objetivo principal de la estabilización es provocar la precipitación de una capa fina de CaCO_3 al interior de las tuberías para evitar la corrosión. El espesor de esta capa debe controlarse para que la tubería de la red de distribución no se obstruya (Letterman, 2001). Un agua estabilizada no disuelve ni precipita CaCO_3 , no remueve las incrustaciones de CaCO_3 que puedan proteger a las tuberías contra la corrosión, ni precipitan depósitos de CaCO_3 que puedan obstruirlas (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2003).

Es importante señalar que aunque el I_L puede estar relacionado con la fuerza que conduce la termodinámica para la deposición, en cierta magnitud, la tasa de los depósitos, algunas veces es más útil para evaluar la masa teórica aproximada del CaCO_3 que podría precipitar sobre la superficie de una tubería. Esta cuantificación es llamada potencial de precipitación

del carbonato de calcio o PPCC. La ecuación para su cálculo es:

$$\text{PPCC} = 50,045 [\text{Alcalinidad}_{\text{inicial}} - \text{Alcalinidad}_{\text{equilibrio}}] \quad \text{Ec-3}$$

en unidades de mg CaCO_3 /L. Durante la precipitación del CaCO_3 , los equivalentes de calcio precipitado deben ser iguales a los equivalentes de la alcalinidad precipitada. Un PPCC positivo denota sobresaturación y los mg de CaCO_3 /L que deben precipitar. Un PPCC negativo indica instauración y cuanto CaCO_3 debe disolverse. (Loewenthal *et al.*, 2004; Do-Hwan *et al.*, 2008).

El PPCC es el grado actual de sobresaturación del CaCO_3 (si es positivo) o instauración (si es negativo) en miligramos por litro. Si el hidróxido es también expresado en miligramos por litro como CaCO_3 , entonces los valores de PPCC – OH mayores que uno indican que más de una molécula de carbonato de calcio se forma por cada molécula de hidróxido generada (Loewenthal *et al.*, 2004; Do-Hwan *et al.*, 2008).

Los índices basados en la saturación del carbonato de calcio, mencionados anteriormente, tales como el Índice de Langelier y el potencial de precipitación del carbonato de calcio, permiten determinar si un agua es estable o no, y si tiene el potencial de precipitación que permite la formación de una capa protectora sobre la superficie metálica. Sin embargo, un agua que cumple con los valores límites de acuerdo a los índices anteriores puede resultar corrosiva. En consecuencia, Ryznar propuso usar un índice empírico para determinar el carácter corrosivo o incrustante de las aguas. Se ha confirmado que el valor de este índice permite determinar el comportamiento del agua. Puede por consiguiente, asegurar la protección de la red, ya que basándose en el valor de este índice y ajustando los valores del pH y del Título Alcalimétrico Completo (TAC) del agua en el sistema, se puede obtener así un valor del índice de Ryznar correspondiente a un agua ligeramente incrustante. El índice de Ryznar se define como:

$$I_R = 2\text{pH}_s - \text{pH} \quad \text{Ec-4}$$

Si $I_R < 6$, indica que el agua es incrustante

Si $6 < I_R < 7$, indica que el agua está cercana al equilibrio

Si $I_R > 7$, indica que el agua es corrosiva. Este índice fue desarrollado de observaciones empíricas de las tasas de corrosión y formación de películas en tuberías principales de acero y agua caliente en serpentines de vidrio, para determinar el carácter corrosivo o incrustante de las aguas (Letterman, 2001)

Cabe destacar que los parámetros más importantes a considerar en la calidad inicial del agua son: la dureza, la alcalinidad y el pH. Si hay valores bajos de dureza se produce deterioro y corrosión en la red por agua agresiva, pudiendo corregirse añadiendo cloruro cálcico, mientras que si los valores de dureza son elevados se formarán incrustaciones, calcificación de los filtros, agua turbia, etc, y deberá corregirse añadiendo sustancias secuestrantes que mantienen el calcio y el magnesio en disolución. Como se ha indicado anteriormente, la alcalinidad del agua viene determinada por la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos que actúan como reguladores de los cambios de pH. El intervalo óptimo de pH es 6,8 - 7,2 y se corresponde con una alcalinidad bicarbonatada. Si hay una alcalinidad elevada, puede presentarse dificultades para su ajuste, estar el agua turbia por precipitaciones y presentar un pH alto, mientras que si la alcalinidad es baja se pueden producir fluctuaciones del pH, corrosión y pH bajo. Existen productos comercializados para aumentar y disminuir la alcalinidad total. El pH del agua es fundamental para la efectividad desinfectante de los productos clorados por lo que deberá encontrarse siempre en el rango de valores adecuado (Letterman, 2001).

ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN

Las formas más comunes de lograr el control de la corrosión son: seleccionar apropiadamente los materiales del sistema y el diseño del mismo, modificar la calidad de agua con tratamiento químico y usar revestimientos y pinturas resistentes a la corrosión.

Selección de los Materiales

Los materiales convencionales para tuberías de redes distribución de agua potable tienen ventajas y desventajas en cuanto al grado de confiabilidad en el tiempo. Cada material posee un grado de vulnerabilidad durante su transporte, instalación y funcionamiento en el tiempo (Avila & Clavijo, 2002). Algunos materiales para tuberías son más resistentes a la corrosión que otros en un ambiente específico. Mientras menos

reactivo sea el material con su ambiente tendrá más resistencia a la corrosión. Colocar materiales inadecuados en un servicio de tuberías puede causar serios problemas en la calidad del agua y eso también perjudicaría la inversión realizada. Para proteger las inversiones en la rehabilitación, siempre se debe evaluar el costo considerando el control de la corrosión del sistema de distribución a través de operaciones de limpieza, revestimiento o reemplazo. Pocos servicios pueden seleccionar los materiales basándose solamente en la resistencia a la corrosión; ya que además de este aspecto, la selección de materiales alternativos frecuentemente debe ser evaluada incluyendo el costo, la disponibilidad de uso, la facilidad de instalación y el mantenimiento (Bilurbina *et al.*, 2003).

En todo el sistema se deben usar materiales compatibles. Dos tuberías de metal que tienen diferentes actividades, tales como una de cobre y otra de hierro galvanizado, que llegan a estar en contacto directo con otras pueden establecer una celda galvanizada y causar corrosión. En la medida de lo posible, los sistemas domésticos deben ser diseñados para usar el mismo metal a lo largo de toda la tubería o usar metales que tengan una posición similar en la serie galvánica. La corrosión galvánica se puede evitar colocando acoplamientos dieléctricos (aislantes) cuando están presentes metales diferentes. El servicio de agua potable podría no tener control sobre la selección e instalación de los materiales de plomería doméstica, pero no debe pasarse por alto la posibilidad de trabajar sobre la influencia de los códigos de plomería para que sean más compatibles con las opciones de tratamiento de agua disponibles (Letterman, 2001).

Consideraciones de Ingeniería

El diseño de los tubos y las estructuras pueden ser tan importantes como la selección de los materiales de construcción. Un diseño defectuoso puede causar severa corrosión, aún en materiales que podrían ser altamente resistentes a ella. Primero y principal, la química del agua debe ser utilizada para determinar cuál es el material apropiado. Por ejemplo, muchas aguas de alta alcalinidad con alto contenido de sulfato y un pH de neutro a ligeramente ácido son incompatibles con tuberías de cobre. Muchas aguas suaves son básicamente incompatibles con tubos galvanizados, pero éstos tienen un excelente comportamiento en muchas situaciones de agua dura que a su vez son

problemáticas para tubos de cobre (Letterman, 2001). Es importante mencionar que un aspecto importante en la red de distribución de agua potable, son las presiones manejadas en el sistema. La cantidad y frecuencia de roturas en tuberías de distribución de agua potable es directamente proporcional a la presión de trabajo, hecho que incrementa la cantidad de agua perdida en fugas no detectables, que también es directamente proporcional a la presión (Avila & Clavijo, 2002).

A continuación, se indican algunas consideraciones de diseño para los sistemas de tuberías de todos los tamaños: evitar las porciones de tuberías con agua estancada; proporcionar un drenaje adecuado; seleccionar una velocidad de flujo apropiada y un espesor del metal adecuado; eliminar las áreas protegidas y reducir las tensiones mecánicas; evitar la distribución de calor irregular, las curvas severas y los codos; proveer un aislamiento adecuado; escoger una forma y geometría apropiadas para el sistema; proveer fácil acceso a la estructura para la inspección periódica, mantenimiento y reemplazo de las partes dañadas; eliminar las conexiones a tierra de los circuitos eléctricos al sistema (Nakamatsu, N., 1997).

Tratamiento Químico

a) Ajuste de pH

El ajuste del pH es el método más común para la reducción de la corrosión en los sistemas de distribución de agua. Los iones hidronio (H^+) actúan como receptores de electrones y entran rápidamente en las reacciones de corrosión electroquímicas. Las aguas ácidas son generalmente corrosivas, debido a la alta concentración de iones hidronio. El pH del agua es el principal factor que determina la solubilidad de la mayoría de los materiales de la tubería y las películas que se forman de los productos secundarios de la corrosión. La mayoría de los materiales usados en los sistemas de distribución de agua se disuelven más rápido con un pH más bajo. Cuando la alcalinidad por carbonato está presente, al incrementar el pH, aumenta la cantidad de iones carbonato en la solución. Sin embargo, con demasiada adición de carbonato, un agua podría convertirse en formadora de exceso de incrustaciones o provocar dificultades para el ajuste de su pH (Letterman, 2001).

Cabe señalar que el control del pH en la potabilización del agua es bien importante, principalmente en:

- 1.- La coagulación, hay un valor de pH para el cual el proceso es más eficiente, el cual dependerá del coagulante a utilizar y de la naturaleza del agua a tratar, para lo cual debe realizarse las pruebas de jarra. Teóricamente para sales de aluminio el rango de pH es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro el rango de pH óptimo es de 5,5 a 8,5.
- 2.- La desinfección, la reacción de hipoclorito adiciona iones H^+ , disminuyendo el pH

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HOCl \longrightarrow H^+ + OCl^-$$
- 3.- La suavización o ablandamiento y en los procesos aerobios y anaerobios.
- 4.- La estabilización, el agua es corrosiva si disuelve metales, e incrustante si precipita los metales. El agua debe ser estable, para lo cual se usa el índice de Langelier (Sawyer *et al.*, 2001).

La relación entre el pH y otros parámetros de la calidad del agua, tales como carbono inorgánico disuelto (CID), alcalinidad, dióxido de carbono (CO_2) y la fuerza iónica gobiernan la solubilidad del $CaCO_3$, la cual está comúnmente relacionada con la formación de una capa protectora en el interior de la superficie de las tuberías. Para fomentar la formación de esta capa protectora, el pH del agua debe estar, por lo general, ligeramente por encima del pH de saturación del $CaCO_3$. El pH apropiado para cualquier sistema de distribución de agua es específico para cada calidad de agua y materiales del sistema, por lo tanto, solo se puede suministrar lineamientos generales. Si el agua contiene una cantidad moderada de alcalinidad por carbonato y dureza, el personal de la compañía abastecedora debe primero calcular el ISL o el PPCC para determinar a qué pH el agua es estable respecto al $CaCO_3$. Para comenzar, el pH del agua debe ser ajustado tal que el ISL sea positivo, no más de 0,5 unidades por encima del pHs, o el PPCC debe ser ajustado a un valor ligeramente positivo. Si ninguna otra evidencia está disponible, tal como un buen historial del efecto del pH sobre las capas protectoras de $CaCO_3$, o resultados de pruebas de campo o del laboratorio, entonces el ISL y/o el PPCC proporcionan un buen punto de partida. Manteniendo el pH sobre el pHs debe causar una capa mezclada protectora en las tuberías principales de hierro fundido. Si no se forman estas capas, el pH debe ser aumentado de 0,1 a 0,2 unidades, o incrementarse el PPCC hasta que una capa protectora comience a formarse. El monitoreo de la

estabilidad del pH en el sistema de agua, el agotamiento del residual de cloro y los niveles de turbidez se deben chequear para resolver los problemas buffer o posibles situaciones de “agua coloreada” (Loewenthal *et al.*, 2004).

Los ortofosfatos y otros inhibidores con frecuencia requieren un rango reducido de pH para máxima efectividad. El rango del pH óptimo varía con el material. Si se usa un inhibidor, se deben dar las recomendaciones para ajustar el pH dentro de los rangos efectivos para los materiales de interés. Algunos estudios han sido realizados explorando las relaciones del pH / CID / PO_4^{-3} relativas a la corrosión de las tuberías de plomo, hierro galvanizado, cobre y asbesto-cemento. Se debe también tener en cuenta las interacciones secundarias, tales como las limitaciones de solubilidad del carbonato de calcio o del fosfato de calcio que restringen el posible rango del pH. El pH debe ser ajustado después de la filtración, debido a que la coagulación óptima para las aguas, generalmente, requiere de un pH más bajo (Maddison *et al.*, 2001).

b) Alcalinidad / Ajustes de la Concentración de CID

El ajuste del pH es insuficiente para controlar la corrosión en aguas con baja alcalinidad de bicarbonato o carbonato. Un depósito protector de CaCO_3 o hidroxicarbonatos de hierro / calcio mezclados, por ejemplo, no se formará sobre los materiales ferrosos o entre las partículas de materiales basados en cemento, a menos que una cantidad suficiente de iones de calcio y carbonato estén presentes en el agua. Estas relaciones de concentración de CID / pH también gobiernan la capacidad buffer del agua, y el aumento del pH por encima del punto mínimo del buffer, alrededor de un pH 8,3 puede producir incrementos drásticos en la estabilidad del pH en todo el sistema de distribución (Loewenthal *et al.*, 2004).

Una guía para la nucleación y crecimiento del CaCO_3 , es cuando se ha encontrado la siguiente relación:

$$[\text{Ca}^{+2}] [\text{CO}_3^{-2}] > 40 \text{ Kps } \text{CaCO}_3 \quad \text{Ec-5}$$

donde Kps CaCO_3 es la constante de solubilidad para la calcita corregida por la fuerza iónica y la temperatura. En los Estados Unidos, se ha recomendado un valor de PPCC de 4 a 10 mg CaCO_3/L , para el control de la corrosión, a un pH de 6,8 a 7,3. Las recomendaciones del balance apropiado de la dureza de calcio y

alcalinidad para una protección de la corrosión del sistema de distribución y mantenimiento de la calidad del agua varían. Internacionalmente, las sugerencias caen en el rango de aprox. 40 a 80 mg CaCO_3/L tanto para la dureza de calcio como para la alcalinidad total. (Letterman, 2001).

El exceso de alcalinidad por hidróxido no ayuda en la precipitación del carbonato de calcio. Estas relaciones pueden ser computarizadas, o vistas gráficamente, a través del uso de los diagramas de Caldwell-Lawrence. Para algunos sistemas de agua, el exceso de carbonato, el control del pH y la neutralización del dióxido de carbono agresivo se pueden lograr de una manera directa usando los sistemas de contacto con piedra caliza, o por mezcla con piedra caliza, o a través de lechos filtrantes con material dolomítico (Loewenthal *et al.*, 2004).

Cabe mencionar, que con respecto a otros métodos, como el índice de saturación de Langelier, el índice de estabilidad de Ryznar, el índice de Larson y Duswell, índice de corrosión de Riddick, y los diagramas de Caldwell-Lawrence para determinar la agresividad e incrustabilidad del agua; el método de Mojmir Mach interrelaciona aspectos como la aportación de iones “ajenos” (iones presentes en el agua diferentes al calcio, bicarbonato, carbonato y protones) con la fuerza iónica, las relaciones fundamentales de disociación del agua y del ácido carbónico y la ecuación de electroneutralidad. La representación gráfica de este equilibrio de saturación está basada en el diagrama de equilibrio de Tillmans, a través de un sistema de coordenadas con ordenada $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ y abscisa $\frac{1}{2} [\text{HCO}_3^-]$ que permite determinar la agresividad de un agua; este diagrama tiene la ventaja de que la ecuación de la curva de equilibrio es de fácil representación geométrica. En este sistema de coordenadas se pueden representar las concentraciones determinadas de $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ y $[\text{HCO}_3^-]$ obtenidas a partir de la acidez y alcalinidad del agua, respectivamente, incluyendo los iones ajenos en el equilibrio de saturación. Si el punto está por debajo de la curva de equilibrio, se clasifica a ésta como un agua incrustante, y cuando está arriba de la curva se clasifica como un agua agresiva. El cálculo de la agresividad del agua de Mojmir Mach está basado en la teoría de Langelier para determinar si un agua es agresiva o incrustante, sin embargo, se puede usar un criterio similar o el propuesto por Langelier para conocer cuantitativamente la incrustabilidad del agua (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2003).

Algunos metales, como el plomo, zinc y cobre, pueden formar una capa de carbonato insoluble, carbonato básico, óxido o hidróxido, minimizando las tasas de corrosión, y la disolución de estos metales. En aguas con baja alcalinidad, el ión carbonato debe agregarse para formar estos carbonatos insolubles. Para tales aguas, la soda ash (Na_2CO_3) o bicarbonato de sodio (NaHCO_3) son generalmente los químicos preferidos y usados para ajustar el pH, porque ellos también contribuyen con los iones carbonato (CO_3^{2-}) o bicarbonato (HCO_3^-). El número de iones carbonato disponibles es una función compleja del pH, temperatura y otros parámetros de la calidad del agua. Estos metales también forman fuertes complejos acuosos de carbonato que aumentan la solubilidad del metal cuando la concentración del CID excede un nivel crítico a un pH dado. El valor exacto de este nivel crítico depende de muchos factores, tales como fuerza iónica, temperatura y la presencia de cationes y ligandos que forman complejos, además del pH. El nivel debe ser calculado, usando las ecuaciones de equilibrio químico apropiadas para determinar la solubilidad del metal para la calidad del agua dada. Frecuentemente el efecto beneficioso del pH pesa más que el efecto de formación de complejos, y se traduce por una reducción neta de desprendimiento del metal (Letterman, 2001).

c) Control del Oxígeno

La presencia excesiva de oxígeno disuelto aumenta la actividad corrosiva del agua. El nivel óptimo de oxígeno disuelto para el control de la corrosión es de 0,5 a 2,0 partes por millón. Sin embargo, retirar el oxígeno del agua no es práctico debido al costo. Por lo tanto, la estrategia más razonable para minimizar la presencia del oxígeno es: Excluir el proceso de aireación del tratamiento del agua; incrementar el ablandamiento con cal; extender los periodos de detención de las aguas tratadas en los tanques de almacenamiento y usar el tamaño correcto de bombas de agua en la planta de tratamiento para minimizar la introducción del aire durante el bombeo (National Environmental Services Center, 1997).

Si el oxígeno pudiera ser completamente removido del agua de forma económica, tanto el inicio de los ataques por corrosión como la corrosión en curso podría ser reducida. Sin embargo, cuando las aguas son desinfectadas con cloro, cloroamina u otros agentes oxidantes, y se mantienen residuales en el sistema de distribución, la corrosión estará presente. Así que la

remoción del oxígeno no es un método para el control de la corrosión ni práctico ni económico, y se convierte esencialmente irrelevante con la presencia del residual desinfectante (Eisnor & Gagnon, 2004).

Por otra parte el oxígeno disuelto juega un papel en la creación de películas pasivas sobre las tuberías de hierro no revestidas, ya que facilita la formación de capas de películas pasivas favorables que consisten en una mezcla de carbonato de calcio, carbonato ferroso y capas pasivas de óxido férrico. La pérdida del oxígeno disuelto promueve la formación de hierro ferroso que cuando se desprende en el agua, puede ser fácilmente reoxidizado por el aire o al contacto con un desinfectante, causando agua turbia y coloreada (Letterman, 2001).

d) Inhibidores Químicos

La corrosión puede ser controlada agregándole químicos al agua que formen una película protectora sobre la superficie de una tubería y proporcionen una barrera entre ésta y el agua. Estos químicos, llamados inhibidores, reducen la corrosión o limitan la solubilidad del metal, pero no la previenen totalmente. Los cuatro tipos de inhibidores químicos aprobados para el uso en sistemas de agua potable son ortofosfatos, polifostatos, fosfatos mezclados y silicatos de sodio (Maddison *et al.*, 2001). El éxito de cualquier inhibidor de corrosión depende de la habilidad del operador del agua en: Aplicar el doble y el triple de la dosis de diseño del inhibidor durante las aplicaciones iniciales para construir una capa base protectora que prevenga picaduras (nótese que las capas iniciales típicamente toman varias semanas para formarse.); mantener dosis del inhibidor continuas y suficientemente altas para prevenir la redisolución de la capa protectora; y alcanzar un flujo de agua constante sobre las superficies metálicas del sistema para permitir una aplicación continua del inhibidor (National Environmental Services Center, 1997).

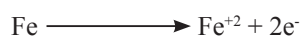
Las interrupciones en la adición del inhibidor pueden causar pérdida de las películas protectoras por la disolución y bajar las concentraciones podría prevenir la formación de las capas protectoras en toda la superficie. Además manteniendo un pH apropiado y las características de la calidad del agua, el control de la corrosión dependerá de la alimentación del inhibidor. Los inhibidores de la corrosión frecuentemente no pueden reducir la corrosión en tanques de almacenamiento porque el agua no está fluyendo y el

inhibidor no es alimentado continuamente. Para evitar la corrosión de los tanques, es necesario usar una capa protectora, protección catódica o ambos (Letterman, 2001).

El silicato de sodio ha sido usado por más de 60 años para reducir la corrosividad. Su efectividad depende del pH y de la concentración del carbonato. Los silicatos de sodio son particularmente efectivos para sistemas con altas velocidades de agua, baja dureza, baja alcalinidad y un pH menor de 8,4. Típicamente, las dosis de silicato de sodio para un mantenimiento de la protección fluctúan entre 2 a 12 miligramos por litro. También ofrecen ventajas en sistemas de agua caliente debido a su estabilidad química, a diferencia de muchos fosfatos. Antes de instalar alguna tecnología para suministrar inhibidores de corrosión, se deben probar varios métodos o agentes en un medio ambiente de laboratorio para determinar el mejor inhibidor y la concentración para cada sistema (National Environmental Services Center, 1997).

Es importante mencionar que los inhibidores pueden clasificarse según su modo de acción, aún cuando, un mismo producto puede actuar de varias formas.

- Inhibidores anódicos, se caracterizan por formar una película protectora sobre las superficies anódicas bloqueando la siguiente reacción electroquímica:



Ejemplos de ellos son: los cromatos, nitritos, fosfatos, molibdatos, silicatos, boratos y benzoatos. Los tanatos y la hidracina actúan también parcialmente de ese modo. Cuando estos productos se usan solos la dosificación debe ser alta (del orden del g/L) para evitar los riesgos de corrosión por picaduras.

- Inhibidores catódicos que forman una película protectora sobre las superficies catódicas por creación de un compuesto insoluble a pH elevado, bloqueando así la reacción electroquímica relacionada con el oxígeno. Ejemplos de ellos son las sales metálicas, en particular, del zinc, fosfatos e inhibidores orgánicos (Loewenthal *et al.*, 2004).

En la práctica, la mayoría de los inhibidores son basados en composiciones binarias constituidas por un elemento activo, generalmente zinc, para las zonas catódicas y polifosfato, cromato o un producto orgánico sintético, para las zonas anódicas. La acción

de los inhibidores se estabiliza, refuerza o amplifica por combinación con otros productos, tales como, sales amortiguadoras, catalizadores, dispersantes, entre otros (Maddison *et al.*, 2001).

Revestimientos, Capas y Pinturas

Otra técnica para mantener el agua corrosiva fuera del contacto con las paredes de la tubería es mediante el revestimiento de éstas con una capa protectora. Estos revestimientos son usualmente aplicados mecánicamente cuando la tubería es fabricada o antes de ser instalada. Algunas veces los revestimientos se pueden aplicar aún después de que la tubería está en servicio, pero en este caso el método es mucho más costoso. Los revestimientos más comunes son los esmaltes de alquitrán de hulla, pinturas epóxicas, cemento y polietileno. El uso de revestimientos debe ser cuidadosamente monitoreado, porque ellos pueden ser la fuente de varios problemas de la calidad del agua, tales como crecimiento microbiológico, sabor, olor y lixiviado de solventes. Aunque los productos basados en alquitrán de hulla han sido ampliamente usados en el pasado para el contacto con el agua potable, se han detectado problemas con su uso por la presencia de hidrocarburos aromáticos polinucleares y otros componentes peligrosos en el alquitrán y sus potenciales migraciones hacia el agua (Bilurbina *et al.*, 2003).

Un método común para extender la vida de la tubería y la resistencia de la misma a la corrosión y a las propiedades hidráulicas es la deposición controlada de una película de carbonato de calcio o el proceso de recubrimiento con cemento. Para proteger la inversión en tiempo, dinero y materiales, así como también para evitar la degradación de la calidad del agua, un servicio que use tuberías revestidas nuevamente por cemento necesita considerar el ajuste apropiado de la química de agua potable para proteger los revestimientos, además de los otros objetivos del control de la corrosión (Bilurbina *et al.*, 2003).

Cuando la difusión del oxígeno hacia las zonas catódicas es importante, el hidróxido ferroso se oxida a férrico que coprecipita con CaCO_3 si el contenido en el agua del bicarbonato de calcio es suficientemente elevado. Este proceso ocurre en un rango de pH de 7,0 a 8,5 y asegura la formación de una capa protectora natural, llamada película de Tillmans. En la práctica es esta última la que asegura la protección de la mayoría

de las tuberías en las redes de distribución de agua. Para formarse esta capa se deben cumplir las siguientes condiciones: a) concentración en oxígeno disuelto superior o igual a 4,0 – 5,0mg/L; b) contenido en CO₂ libre igual al que corresponde al equilibrio del sistema carbonato; c) alcalinidad bicarbonatada suficiente para sobrepasar el producto de solubilidad del carbonato de calcio en las zonas catódicas (70 a 110 ppm de CaCO₃ equivalente). La probabilidad de que este tipo de protección tenga lugar se determina por el índice de Ryznar (Letterman, 2001).

CONCLUSIONES

En conclusión, los fenómenos de corrosión y de incrustación causan deterioro en los sistemas de distribución produciéndose perforaciones y obstrucciones en las tuberías. Estos fenómenos están relacionados con las características fisicoquímicas del agua, así como también con material con el cual el agua entra en contacto, ya que las interacciones entre los materiales de la tubería y el agua pueden causar corrosión. El desarrollo de biopelículas en un sistema de distribución también puede originar corrosión al proveer un ambiente donde pueden ocurrir procesos fisicoquímicos. Específicamente, la alcalinidad, el pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión.

La protección de las tuberías contra la formación de las incrustaciones se puede lograr proporcionándole al agua un carácter ligeramente incrustante de forma de crear una película aislante sobre las paredes, pero evitando una obstrucción de las tuberías. Basándose en el valor del Índice de Ryznar y ajustando los valores de pH y de alcalinidad del agua en el sistema, se puede asegurar la protección de la red, obteniéndose así el valor de dicho índice correspondiente a un agua ligeramente incrustante.

Para controlar la corrosión se necesita: seleccionar adecuadamente los materiales del sistema y el diseño apropiado del mismo; realizar un tratamiento químico adecuado para modificar la calidad del agua, tomando en cuenta el pH, alcalinidad, control del oxígeno y los inhibidores químicos; suministrar protección catódica, principalmente para la corrosión externa y usar revestimientos y pinturas resistentes a la corrosión.

Corrosion and incrustations in the drinking water distribution systems: Review of control strategies

SUMMARY

The aim of this review was to analyze control strategies of contamination caused by the formation of corrosion and incrustations based on factors affecting deterioration of distribution systems of potable water as well as its influence on the quality of water supplied to the consumer. Distribution systems can affect the quality of drinking water due to the conditions of the pipes and the system's operation. Corrosion, incrustations, and deposits in the distribution network major problems in the drinking water industry. These may affect health, public acceptance of the water supply and the cost of supplying reliable water. We conclude and recommend that, in order to control corrosion and the formation of incrustations, one must select appropriate materials and a sound system design, apply proper chemical treatment (adjusting pH, alkalinity, oxygen, the use of corrosion inhibitors) and use coatings and paints resistant to corrosion in order to protect the walls of the pipes.

Key Words: Distribution network, potable water, corrosion, incrustations.

REFERENCIAS

- AWWA (American Water Works Association) (2002). *Finished Water Storage Facilities*. Documento en línea: <http://www.google.com> (Consultado: 2009, Noviembre 18).
- Ávila H. & Clavijo W. (2002). *Renovación y Rehabilitación de Redes de Distribución de Agua Potable y de Alcantarillado*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Documento en línea: <http://www.google.com> académico.com (Consultado: 2010, Julio 20)
- Bilurbina, L., Liesa F. & Iribarren J. (2003). *Corrosión y Protección*. 1ª edición. Ed. UPC., Barcelona, España.
- Do-Hwan K., Dong-Youn K., Soon-Heon., Ji-Won K. & Chang-Won K. (2008). Development and

- Implementation of a Corrosion Control Algorithm Based on Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) in a Drinking Water Distribution System. *Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA*. **57**: 531 - 539.
- Eisnor J. & Gagnon G. (2004). Impact of Secondary Desinfection on Corrosion in a Model Water Distribution System. *Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA*. **53**: 441 - 452.
- Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela N° 5.453. Extraordinaria (2000). *Constitución de la Republica Bolivariana de Venezuela*. Capitulo V. Art. 83,84, Caracas. Documento en línea: <http://www.defensoria.gov.ve> (Consultado: 2009, Noviembre 18).
- Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela N° 5.568. Extraordinario (2001). *Ley Orgánica para la Prestación de los Servicios de Agua Potable y de Saneamiento*. Caracas. Documento en línea: <http://www.defensoria.gov.ve> (Consultado: 2009, Noviembre 18).
- Gaceta Oficial de la Republica de Venezuela. Año CXXV – Mes V. N° 36.395. Decreto MSAS N° SG – 018 – 98 (1998). *Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable*. Capítulo II. Art. 8 hasta 13. Capítulo III. Art. 14, Caracas. Documento en línea: <http://www.defensoria.gov.ve> (Consultado: 2009, Noviembre 18)
- Letterman R. (2001). *Water Quality and Treatment*. 5th. Ed. McGraw-Hill, INC., New York.
- Loewenthal R. E., Morrison I. & Wentzel M. C. (2004). Control of Corrosion and Aggression in Drinking Water Systems. *Water Science and Technology*. **49**: 9-18.
- Maddison L., Gagnon G. & Eisnor J. (2001). Corrosion Control Strategies for the Halifax Regional Distribution System. *Can. J. Civ. Eng.* **28**: 305 - 313.
- Mora V. & Cedeño J. (2006). Valuación de la Corrosión e Incrustaciones en Instalaciones Hidráulicas de una Planta de Potabilización en el Estado Bolívar, Venezuela. *Bol. Mal. Salud Amb.* **46**: 67-78.
- Nakamatsu N. (1997). *Calidad del Agua en la Red de Distribución*. (Documento en línea: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/nakamatsu.pdf> (Consultado: 2009, Noviembre 18)
- National Environmental Services Center (1997). *Control de la Corrosión. Tecnología en Breve*. 1-4. Disponible en línea: <http://www.google.académico.com> (Consultado: 2010, Julio 20)
- Red Iberoamérica de Potabilización y Depuración del Agua. (2003). *Tecnología Informática para Evaluar la Agresividad del Bióxido de Carbono en el Agua. Agua Potable para Comunidades Rurales, Reúso y Tratamientos Avanzados de Agua Residuales y Domésticas*. Capítulo 12. 142 – 154. Documento en línea: <http://www.google.académico.com> (Consultado: 2010, Julio 20)
- 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.
- Sawyer C., McCarty P. & Parkin G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. 4ta. Ed. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá, D.C., Colombia.
- Trujillo E., Martínez V. & Flores N. (2008). Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono. *Información Tecnológica*. **19**: 89-101.
- Varo Galvañ P., Chillón M. F. & Prats D. (2004). *Características Fisicoquímicas de las Aguas Abrandadas. Ingeniería Química*. Universidad de Alicante. 146-150. Documento en línea: <http://www.google.académico.com> (Consultado: 2010, Julio 20)

Recibido el 01/03/2010
Aceptado el 03/09/2010