IA-HT-2018-02

HOJA TÉCNICA

"Remoción de hierro y manganeso en agua para consumo humano"

Área Funcional Investigación Aplicada

UEN Investigación y Desarrollo

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo

AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS, ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI

Yo, Annette Henchoz Castro
_____

N° Cédula: 1-0725-0409
_____

Dependencia: Gerencia General

_____

Autorizo como Sub Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital, Catálogo en línea (OPAC) y la intranet institucional de la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: centrodoc@aya.go.cr **N° Teléfono**: 2242-5487

Annette Henchoz Castro Firmado digitalmente por Annette Henchoz Castro Fecha: 2019.11.25 16:07:20 -06'00'

Firma: _____

REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO EN AGUA PARA CONSUMO HUMANO

1. Estado de la situación

En primera instancia, es importante anotar que el hierro y el manganeso son solamente dos de los diversos elementos inorgánicos que se presentan como trazas en el agua. Igualmente, se debe tomar en cuenta que al menos el hierro forma parte de algunas sales empleadas en potabilización de agua, e incluso es posible encontrarlo en aguas frescas en niveles que se ubican entre 0.5 y 50 mg/l (OMS, 2017). No obstante, cuando se presentan niveles altos de estos dos metales, siempre se recomienda determinar si la fuente del mismo es de origen natural o antropogénico.

Según OMS (2017), el agua subterránea anaerobia puede contener concentraciones de hierro ferroso en el orden de miligramos por litro, sin mostrar necesariamente alguna coloración o turbiedad en el agua recién extraída del pozo. Conforme esta agua se expone a la atmósfera o a algún agente oxidante, el hierro ferroso se oxida a hierro férrico, brindando una coloración rojiza o café al agua. El hierro también promueve el crecimiento de bacterias sintetizadoras de hierro (OMS, 2017), las cuales obtienen su energía de la oxidación análoga a la mencionada anteriormente (forma biológica). Esta es la causa de que muchas veces se encuentren depósitos pastosos dentro de tubos y otros accesorios de sistemas de acueductos.

Por su parte el manganeso, en gran cantidad de ocasiones, acompaña a la presencia de hierro en el agua subterránea. Típicamente esto tiene un origen geológico. Este elemento y sus respectivos compuestos es un causante de acumulación de depósitos en los sistemas de distribución de agua. Es común que en sistemas afectados el material sólido (usualmente dióxido de manganeso) se acumule con el paso del tiempo, lo que provoca que se vaya soltando esporádicamente con el paso del tiempo, similar al caso de los sistemas con biopelícula.

Según Araya (2016), con el fin de comprender mejor las posibles especies del hierro que se pueden encontrar en el agua, se han desarrollado las gráficas de potencial de oxidación-reducción versus pH. El potencial de oxidación-reducción (E_H) de un agua es una forma de medir la energía de oxidación - reducción de un agua mediante el uso de un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y es negativo cuando se produce una reducción. En la siguiente figura se presenta la gráfica de E_H - pH para el hierro, bajo ciertas condiciones específicas del agua. Los compuestos que poseen el símbolo “(s)” son formas sólidas del hierro (Crittenden, 2011).

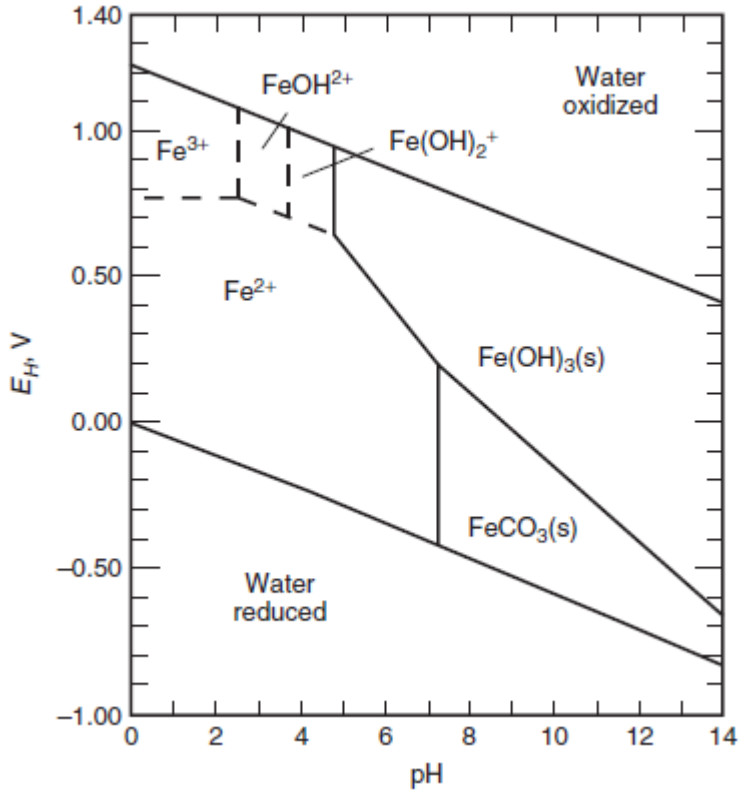

Figura 1 Ejemplo de gráfica E_H-pH para el hierro (Crittenden, 2011)

Como se puede observar en la figura 1, el conocer las condiciones de pH y de potencial redox del agua es importante para el proceso de remoción de este contaminante. Estas variables determinan en gran medida la fase en que se encontrará las diversas especies que contienen hierro en el medio acuoso. Típicamente, para un valor de pH fijo, conforme se incrementa el potencial redox, así se irá pasando de agua con hierro ferroso (soluble) a un fluido que contenga un hierro en una forma insoluble. De hecho, para aguas de origen natura, es posible observar que conforme se incrementa el valor de pH, así de probable es que se alcancen formas insolubles de hierro con un valor bajo de potencial redox.

Las expresiones estequiométricas para la oxidación del hierro ferroso utilizando varios oxidantes se muestran en el cuadro 1. Con estas reacciones y el caudal de agua a tratar se puede obtener el consumo teórico de cualquier oxidante para la transformación del hierro (II) a hierro (III). Es importante que en este punto se tome en cuenta la estequiometría correcta, según las masas molares de cada compuesto y el respectivo análisis dimensional.

Cuadro 1 Reacciones de oxidación para el hierro (Crittenden, 2011)

Oxidante	Reacción
Oxígeno	$4Fe(HCO_3)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8CO_2$
Cloro	$4Fe(HCO_3)_2 + Ca(HCO_3)_2 + Cl_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + CaCl_2 + 6CO_2$
Dióxido de cloro	$Fe(HCO_3)_2 + NaHCO_3 + ClO_2 \rightarrow Fe(OH)_3 + NaClO_2 + 3CO_2$
Permanganato de potasio	$3Fe(HCO_3)_2 + KMnO_4 + 2H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_3 + MnO_2 + KHCO_3 + 5CO_2$

Según Araya (2016), el manganeso se presenta en forma de óxidos e hidróxidos. El manganeso tiene ocho estados de oxidación. A valores de pH de la mayoría de las aguas naturales, Mn^{2+} es la forma predominante del manganeso, como se puede observar en el diagrama de E_H-pH de la figura 2. De hecho, tal y como se aprecia, la oxidación del manganeso puede producir tres distintos óxidos de manganeso, dependiendo de los valores de E_H - pH: MnO_2, Mn_2O_3 y Mn_3O_4, siendo la forma predominante el MnO_2

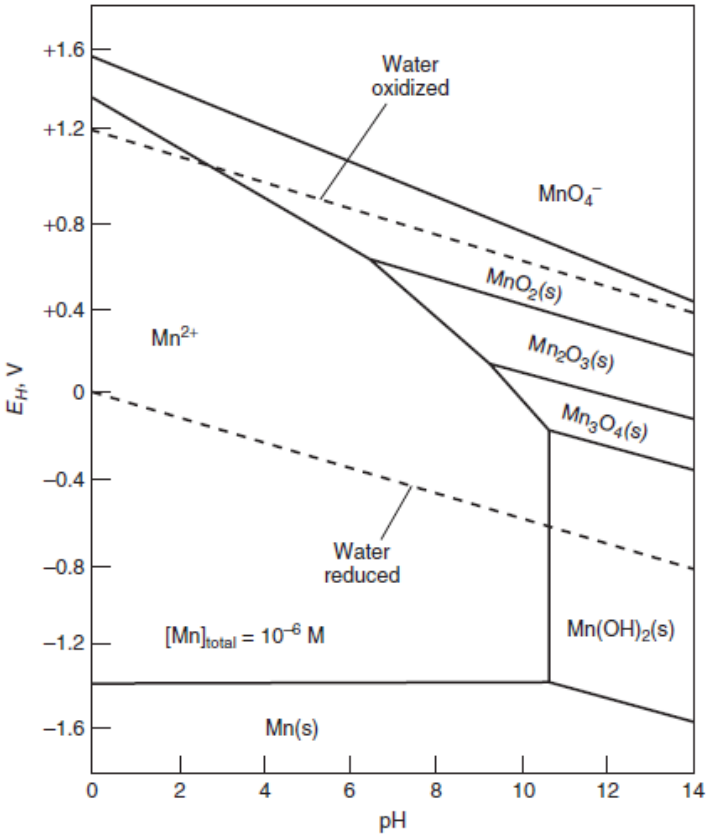

Figura 2 Ejemplo de gráfica E_H-pH para el manganeso (Crittenden, 2011)

Los tres estados de oxidación del manganeso importantes en agua para consumo son:

1. Mn^{2+}: es soluble
2. Mn^{4+}: precipita como MnO_2
3. Mn^{7+}: oxidante fuerte como MnO_4^-

El manganeso soluble, se puede removerse del agua por oxidación, pero la aireación no es un tratamiento efectivo a menos que el pH sea mayor de 9.0 (Crittenden, 2011); esto supone el uso sólo de arena o antracita tradicional. La tasa de conversión del Mn^{2+} a MnO_2 involucra un proceso autocatalítico, donde la formación de MnO_2 provee para la adsorción de Mn^{2+} y acelera su conversión a MnO_2. Debido a este efecto catalítico, no todo el Mn^{2+} que se remueve del proceso se convierte a MnO_2, simplemente puede ser adsorbido en el mismo MnO_2.

Las expresiones estequiométricas para la oxidación del manganeso utilizando varios oxidantes se muestran en el cuadro 2. Con estas reacciones y el caudal de agua a tratar se puede obtener el consumo teórico de cualquier oxidante para la transformación del manganeso. Al igual que en el caso del hierro, es importante que en este punto se tome en cuenta la estequiometría correcta, según las masas molares de cada compuesto y el respectivo análisis dimensional.

Cuadro 2 Reacciones de oxidación para el manganeso (Crittenden, 2011)

Oxidante	Reacción
Oxígeno	$2MnSO_4 + 2Ca(HCO_3)_2 + O_2 \rightarrow 2MnO_2 + 2CaSO_4 + 2H_2O + 4CO_2$
Cloro	$Mn(HCO_3)_2 + Ca(HCO_3)_2 + Cl_2 \rightarrow MnO_2 + CaCl_2 + 2H_2O + 4CO_2$
Dióxido de cloro	$Mn(HCO_3)_2 + 2NaHCO_3 + 2ClO_2 \rightarrow MnO_2 + 2NaClO_2 + 2H_2O + 4CO_2$
Permanganato de potasio	$3Mn(HCO_3)_2 + 2KMnO_4 \rightarrow 5MnO_2 + 2KHCO_3 + 2H_2O + 4CO_2$

Todas estas características de los dos elementos analizados y sus diversas especies son empleadas por diversas tecnologías para reducir la concentración de estos componentes en el agua para consumo humano. Es decir, la remoción del hierro y el manganeso simplemente se basa en sus propiedades físicas y químicas. En secciones subsiguientes se amplía la temática según las alternativas disponibles en el mercado.

Desde el punto de vista de salud pública, WHO (2017) establece que no existe una afectación a la salud comprobada por presencia de hierro en agua para consumo, aunque sí es posible que exista rechazo por parte del consumidor debido a aspectos estéticos. El hierro es un elemento esencial para la nutrición humana, particularmente aquel en estado ferroso. Como precaución frente a alguna potencial acumulación excesiva de hierro en el cuerpo, se ha fijado un valor de 0.8 mg/kg de masa corporal (procedente de todas las fuentes de consumo). El supuesto de

consumo de un 10% del total por medio del agua potable, permite estimar un valor cercano a 2 mg/l en términos preventivos. No obstante, arriba de 0.3 mg/l ya se presentan problemas estéticos.

Para el caso del manganeso, WHO (2017) indica que la mayor proporción del consumo procede de alimentos. Esta misma fuente cita que 0.4 mg/l en agua potable es un valor reconocido para protección de la salud, con base en un consumo diario de 11 mg/d, según dietas típicas, y empleando un factor de seguridad de 3. Se parte de un supuesto de 20% del manganeso en dieta procedente del agua, según un consumo de 2 l/d y en un adulto de 60 kg. WHO (2017) también indica que concentraciones superiores a 0.1 mg/l son causantes de sabor no deseado en bebidas y manchas en losa sanitaria y hasta ropa.

En Costa Rica, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable establece un valor máximo admisible de 0.3 mg/l para el hierro. En el caso del manganeso se establece un valor alerta de 0.1 mg/l y un valor máximo admisible de 0.5 mg/l. Adicionalmente, donde se encuentren los dos metales juntos, se aplica un valor máximo admisible de 0.3 mg/l.

2. Estrategias para tratamiento

Las estrategias de tratamiento para el caso en cuestión muestran procesos que pueden ser incorporados dentro de toda una alternativa tecnológica, que posteriormente se debe adecuar a cada caso particular. Es decir, se muestran conceptos específicos para la química del aluminio en el agua, que se deben complementar según corresponda para atender otras condiciones de calidad de agua que se pudieran presentar. Se mantiene la premisa de que cada caso es único, y de ser posible, se recomienda el uso de sistemas piloto o la recopilación de experiencia operativa para generar eventuales propuestas de tratamiento.

Según Crittenden (2011), los principales procesos que se consideran para remoción de hierro y manganeso son:

- Oxidación con sedimentación y filtración.
- Intercambio iónico.
- Separación por membranas.
- Ablandamiento con cal.
- Remoción biológica.

2.1 Oxidación con sedimentación y filtración

Tradicionalmente, el hierro y el manganeso se oxidan utilizando solamente un oxidante fuerte, como el cloro. Es necesario contar con una concentración de oxidante suficiente para satisfacer las condiciones presentadas en los cuadros 1 y

2, más un valor prudencial de exceso estequiométrico. Una vez que se forman las especies insolubles que contienen los iones metálicos en cuestión, se somete el fluido a sedimentación. Es posible considerar el uso de algún producto químico (usualmente sales inorgánicas) para mejorar la separación del material insoluble de la matriz acuosa. Finalmente, se lleva a cabo una filtración, que típicamente corresponde a filtración rápida.

Debido a que la tasa de oxidación del hierro y el manganeso depende del pH, si solamente se utiliza cloro para su oxidación, se podría requerir un pH de 8 a 8.5 para la oxidación del hierro y un tiempo de contacto de aproximadamente 15 a 30 minutos (Crittenden, 2011). Para la oxidación del manganeso soluble (Mn^{2+}), bajo estas condiciones, se requiere de aproximadamente 2 a 3 horas de tiempo de contacto, por lo que no es efectivo. Una medida que se emplea para mitigar esta situación con el manganeso, es el uso de medios filtrantes catalíticos.

Los medios filtrantes catalíticos son de dos tipos principales: pirolusita o sólidos recubiertos por dióxido de manganeso. Ambos materiales fundamentan su efecto en la propiedad autocatalítica antes mencionada con el dióxido de manganeso y el metal soluble en agua. De ahí que permiten catalizar (acelerar) el proceso, reduciendo de esta manera los tiempos de contacto necesarios para los diseños.

Es importante anotar que estos procesos conllevan la generación de una corriente de desecho proveniente de las purgas de los sedimentadores y de los retrolavados de los filtros. Estos residuos se deben tratar según la normativa legal vigente, en caso de optar por una modalidad operativa “húmeda”. O bien, se deben caracterizar previo a su reincorporación cuando se trata de modalidad operativa “seca”.

2.2 Intercambio iónico

En el caso del intercambio iónico, las especies que se eliminan son iones, tales como el hierro o manganeso. Adicionalmente, la resina de intercambio cuenta con sitios cargados en su interior, algo diferentes a los sitios que ofrecen fuerzas moleculares de atracción (Hendricks, 2011). Comercialmente, es conocido que las resinas de intercambio iónico se pueden clasificar según su origen (naturales o sintéticas) o bien según su grupo funcional.

En el caso de los iones metálicos antes mencionados, las resinas usualmente se aplican cuando hay concentraciones bajas de los metales. Específicamente, Crittenden (2011) hace referencia a concentraciones de menos de 0.5 mg/l. Usualmente, esta aplicación se da para agua de uso industrial o sistemas punto de uso (unifamiliares). No se emplea en casos de gran escala.

Es común emplear resinas catiónicas ácido fuerte en la forma sodio. Según Crittenden (2011), los factores de separación para hierro son menores a los de calcio y el de manganeso es ligeramente inferior al de magnesio. Es por ello que, para el

caso de aguas duras, siempre se podrá remover hierro y manganeso, pero con una frecuencia de regeneración significativamente mayor que en los suavizadores convencionales.

Un aspecto que cabe destacar para este tipo de soluciones es el hecho de que normalmente la resina nueva presenta una cubierta con naturaleza básica. Por lo tanto, es importante que se sigan las recomendaciones del fabricante para puesta en marcha de los sistemas. Esto podría generar una impresión temporal de variaciones en la calidad del agua tratada que claramente no se mantienen con el transcurso del tiempo.

Se debe observar que las soluciones basadas en intercambio iónico dejan de ser prácticas conforme aumenta el caudal de agua a tratar. Asimismo, en cada caso se debe valorar la calidad de agua final, ya que podría presentarse algún grado desmineralización. Igualmente, se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de manera constante. Es común que los ciclos de intercambio iónico sean cortos, por su naturaleza, por lo que se requiere manejo constante de insumos químicos y residuos que se deben valorar para determinar si se clasifican como residuo peligroso.

2.3 Separación por membranas

Es posible encontrar aplicaciones de ósmosis inversa para remover hierro y manganeso solubles (Crittenden, 2011). Según Lenntech (2015), el fenómeno de la Ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso a su través de uno de los fluidos), el fluido que se moverá a través de la membrana será el de menor concentración de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración (Lenntech, 2015).

Al cabo de un tiempo, el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica (Lenntech, 2015). Este concepto es la base para el funcionamiento de la tecnología.

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás. Para poder purificar el agua se necesita llevar a cabo el proceso contrario al de ósmosis convencional, lo que se conoce como ósmosis inversa. Se trata de forzar el paso del agua que se encuentra en un fluido crudo a otra fase (agua) con baja concentración del material que se desea remover. Por lo tanto, es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica.

Para este caso, los fabricantes recomiendan contar con algunas condiciones

mínimas para garantizar el buen desempeño del proceso, valorando parámetros tanto de calidad de agua, como de la hidráulica del acueducto. Por ello, la valoración de este tipo de procesos, siempre se debe contar con un estudio de mercado adecuado. Esta es la única manera en que se pueden generar los criterios técnicos y económicos necesarios para una buena valoración.

Se debe mantener en consideración que, al día de hoy ha bajado el costo de inversión de las soluciones basadas en el uso de membranas. Sin embargo, el requerimiento de operación y mantenimiento es el punto que mayor atención requiere al momento de realizar una valoración de alternativas. Aunque no se discute el beneficio de poder obtener una calidad de agua tratada muy constante, es necesario tomar en consideración algunos costos tales como (Voutchkov, 2013):

- Energía eléctrica, que varían según: presión osmótica, tipo de pre-tratamiento, calidad de agua y temperatura.
- Productos químicos, que varían según: ubicación geográfica, calidad de agua, tipo de pre-tratamiento, y la calidad de agua meta.
- Mano de obra, que debe contemplar al menos: operación continua, supervisión especializada, mantenimiento electromecánico especializado, manejo de productos químicos, laboratorio propio, administración, monitoreo remoto.
- Mantenimiento, que debe contemplar labores para mantener adecuadamente: operaciones de rutina (preventivo y correctivo), equipo de emergencia, estructuras, edificios, tubería.
- Reemplazo periódico de membranas y elementos de pre-tratamiento.
- Tratamiento y disposición final del residuo (rechazo) del proceso.
- Monitoreo ambiental y monitoreo de rutina.
- Costos indirectos de operación y mantenimiento: entrenamiento anual del personal, desarrollo, certificaciones, consumibles, equipo de soporte, servicios, seguros, contingencia de eventos, y otros.

Asimismo, en cada caso se debe valorar la calidad de agua final, ya que podría presentarse algún grado desmineralización. Igualmente, se requiere una gestión operativa muy robusta para tratar y disponer de manera correcta los residuos que genera el proceso de manera constante. Es común que se requiera un nivel de especialización elevado para las labores operativas, de mantenimiento y gestión de residuos.

Esta opción también presenta la dificultad de que cualquier ensuciamiento que pudiera producirse con hierro y manganeso oxidados, puede causar una disminución en la eficiencia del proceso. Por ello, se hace imperiosa la necesidad de contar con un pretratamiento para remover especies oxidadas previamente.

2.4 Ablandamiento con cal

Esta modalidad es efectiva para la remoción de hierro y manganeso, siempre y cuando exista una aireación previa, con un pH superior a 9.8 durante el proceso, y con suficiente alcalinidad presente (> 20 mg/l como $CaCO_3$). Dado que requiere de una inversión muy alta, por la necesidad de re-acondicionamiento posterior del agua, y debido a la gran cantidad de lodo que produce, no se considera una alternativa sostenible (Crittenden, 2011). Se emplea más que todo cuando ya existe alguna instalación para ablandamiento con cal. Por ello, se menciona como una posibilidad, pero no se describe en detalle.

2.5 Remoción biológica

Según Bruins (2016), existe una tendencia para estudiar mecanismos biológicos y fisicoquímicos para remoción de manganeso en las investigaciones que se realizan a nivel mundial. Básicamente, se busca explorar el funcionamiento de instalaciones existentes para remoción de hierro y manganeso, con el fin de caracterizar el óxido de manganeso que permite la maduración de filtros de arena o arena con antracita. Adicionalmente, se intenta verificar si existe algún tipo de microorganismos encargados de favorecer de manera clara los procesos de tratamiento antes indicados.

De acuerdo con lo indicado en la figura 3, existen diversas rutas para la oxidación del manganeso, las cuales están influenciadas por mecanismos que al día de hoy no han podido ser explicados. Bruins (2016) afirma que muchos medios comerciales empleados para remoción de hierro y manganeso son mayoritariamente pirolusita, la cual tiene una buena capacidad de adsorción, pero baja capacidad autocatalítica. El mismo autor indica que la Birnessita es la especie más eficiente para remoción de manganeso, pero de momento no es posible determinar con certeza los factores que la favorecen.

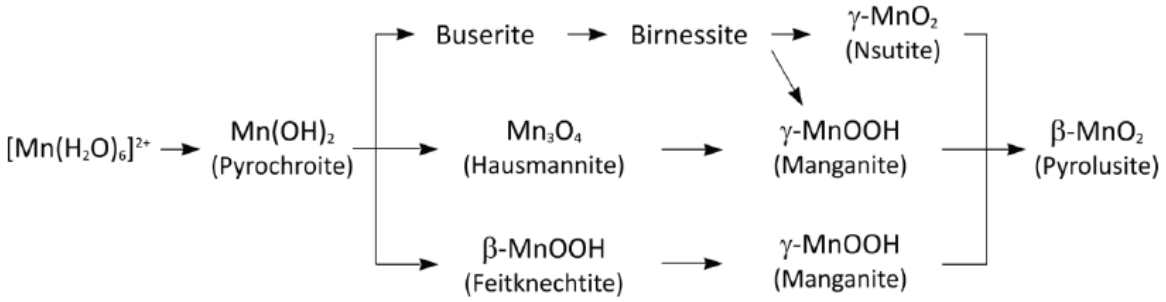

Figura 3 Esquema simplificado de los mecanismos para oxidación del manganeso (Bruins, 2016).

La principal diferencia entre los sistemas de tratamiento empleados en estudios como el de Bruins (2016) y los que existen en Costa Rica y otros países de América,

corresponde al agente oxidante, medio filtrante y la velocidad de filtración. En Europa, donde se han estudiado los mecanismos para oxidación del manganeso, se emplean principalmente plantas que emplean oxidación con aire, emplean arena sílicea y antracita, y además utilizan velocidades de filtración iguales o menores a 5 m/h.

Dado que al día de hoy no existen conclusiones contundentes respecto a los mecanismos biológicos y fisicoquímicos necesarios para una remoción costo-eficiente del hierro y el manganeso, no se considera que esta tecnología mayoritariamente biológica esté suficientemente madura para su implementación como una alternativa más de remoción a gran escala. De hecho, de momento, no se tiene claridad respecto a la relación entre los aspectos citados en las figuras 2 y 3. Por ello, se menciona como una posibilidad, pero no se describe en detalle.

3. Criterios sanitarios

Según Crittenden (2012), algunos de los principales parámetros que afectan la cinética de oxidación del hierro son los siguientes: temperatura del agua, pH, oxígeno disuelto, bicarbonato, materia orgánica natural, sulfatos, sílice soluble y otros. Asimismo, el mismo autor considera que los ácidos húmicos y tánicos y otras formas de materia orgánica natural pueden formar complejos con el hierro y el manganeso, provocando una afectación a la cinética de oxidación de los metales. El hierro que forma un complejo con materia orgánica es soluble y usualmente se asocia con fuentes de agua con alto contenido en color orgánico. Se ha demostrado que el hierro soluble Fe^{2+} no forma complejos en presencia de ácidos húmicos a bajos valores de pH (pH < 5); pero al incrementar el pH (pH > 8) puede resultar en la formación de complejos solubles de Fe^{2+}. Se ha demostrado que la presencia de ácidos húmicos y tánicos inhiben la oxigenación del Fe^{2+}.

3.1 Oxidación con sedimentación y filtración

En el caso de la propuesta de oxidación con sedimentación y filtración, los principales aspectos sanitarios a considerar se muestran en la figura 4. Es importante anotar que la mayoría de criterios presentados para esta alternativa son basados en experiencia operativa de AyA. Asimismo, es fundamental interpretar previamente la calidad del agua, con el fin de que se pueda valorar la necesidad eventual de cambios en algunos valores.

La eficiencia reportada para el proceso de sedimentación y filtración es superior al 90%, siempre y cuando se opere el sistema con material filtrante tipo pirolusita o sólido recubierto con dióxido de manganeso. Ahora bien, si este valor no es suficiente para algún caso particular, es posible considerar algún proceso unitario previo o posterior. Existen reportes de otras plantas potabilizadoras que han operado con medios filtrantes a base de arena virgen, pero con una velocidad de filtración menor o igual a 5 m/h.

Un aspecto importante para operar este tipo de sistemas, bajo un enfoque fisicoquímico, es la relación existente entre la calidad del agua tratada y la frecuencia de retrolavados. Es decir, conforme más baja sea la meta de remoción de hierro y manganeso, más frecuente será la necesidad de llevar a cabo retrolavados. Es por ello que se debe prestar especial atención al diseño de un sistema para homogenización y tratamiento de retrolavados, según sus características particulares. De acuerdo con lo estudiado, al menos sin algún tratamiento químico de por medio, no es posible realizar un vertido de agua de retrolavados a un alcantarillado sanitario o un cuerpo receptor.

Cuadro 3 Criterios sanitarios preliminares para oxidación con sedimentación y filtración (Elaboración propia)

Parámetro	Valor
Tiempo de contacto en oxidación (min)*	> 15
Dosis de oxidante (mg/l)*	Según estequiometría
Intervalo de pH en agua cruda (-)*	> 6.5
Potencial reducción – oxidación (mV)*	> 600
Velocidad de filtración (m/h)	≤ 10
Composición del medio filtrante**	Pirolusita o sólido recubierto por MnO_2
Tiempo de contacto en cama vacía (min)	≥ 5
Velocidad para retrolavado (m/h)	> 30
Frecuencia de retrolavado (h)***	6 - 24
Concentración hierro en retrolavado (mg/l)	0.2 – 4.5
Concentración manganeso en retrolavado (mg/l)	0.2 – 1.5
Concentración sólidos totales en retrolavado (mg/l)	350 – 850
Concentración sólidos suspendidos totales en retrolavado (mg/l)	30 – 550
Concentración sólidos suspendidos sedimentables en retrolavado (ml/l/h)	0.5 - 100
Densidad del retrolavado (g/l)	0.9988 – 0.9994
Eficiencia reportada, sedimentación + filtración (%)	> 90
Eficiencia reportada, sólo sedimentación (%)	< 20

* Puede variar según calidad de agua y tipo de oxidante.
** En caso de emplear arena o arena con antracita, los parámetros pueden variar
*** Según meta de calidad de agua tratada.

Algunos otros parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de hierro y manganeso por oxidación, sedimentación y filtración, son:

- Sustancias consumidoras de alcalinidad.
- Capacidad amortiguadora del agua.
- Balance iónico completo.

3.2 Intercambio iónico

En las fichas técnicas de resinas de intercambio iónico usualmente se indican los parámetros básicos de operación, pero los valores normalmente vienen como intervalos muy amplios. Esto dificulta significativamente la labor del diseñador del sistema. Es por ello que se recomienda tomar los valores del fabricante como referencia, y valorar dos opciones: a) diseñar un sistema muy flexible en términos operativos, o bien b) realizar una prueba piloto previa.

A modo de ejemplo, la empresa Dow Chemical ® indica que tanto el hierro como el manganeso se pueden remover de medios acuosos con bajo niveles de sales disueltas, por medio de resinas de intercambio tipo ácido fuerte. Asimismo, se recomiendan cambios de producto (resinas tipo ácido débil), por tratarse de iones multivalentes. En el cuadro 5 se resumen parámetros típicos recomendados por algunos fabricantes, los cuales se deben verificar por medio de pruebas piloto.

Cuadro 4 Criterios sanitarios preliminares para intercambio iónico (Dow Chemical, 2018)

Parámetro	Resina catiónica tipo ácido fuerte	Resina catiónica tipo ácido débil
Grupo funcional	Ácido sulfónico	Ácido carboxílico
Capacidad total de intercambio, mínima (eq/l)*	2	3.8
Tamaño promedio de partícula (µm)*	600 - 700	300 - 1200
Densidad de partícula (g/ml)*	1.2	1.2
Densidad aparente (g/ml)*	0.8	0.8
Intervalo de pH de operación (-)*	0 - 14	5 - 14
Profundidad del lecho, mínimo (m)*	0.45	0.80
Velocidad operación (m/h)*	5 - 150	5 - 50
Velocidad regeneración (m/h)*	1 - 10	1 - 10
Requerimiento de agua para enjuague (bed volume)*	3 - 6	3 – 6
Regenerante	HCl: 4 – 8% H_2SO_4: 1 – 10%	HCl: 1 – 5% H_2SO_4: 0.5 – 0.8%
Caída de presión estimada a 50 m/h y 20 °C (bar/m)	0.5	0.9

* Confirmar con prueba preliminar.

Las pruebas piloto para este tipo de alternativas se pueden ajustar satisfactoriamente a caudales de tratamiento bajos, lo cual facilita la obtención de

resultados en un plazo muy corto. Esto también representa el hecho de que los módulos de intercambio iónico usualmente alcanzan sus puntos de ruptura muy rápido, lo cual influye directamente en la operación. Se debe mantener presente el hecho de que conforme más extenso sea el tiempo para quiebre, más grande y complicado de operar será el sistema. Aunque hay resinas aptas para potabilizar aguas, este tipo de alternativa usualmente viene del mercado de aguas industriales, donde no se trabaja con las mismas condiciones de un acueducto.

Algunos parámetros a considerar, además de los reportados por algunos fabricantes de tecnología, como posibles interferentes para la remoción de aluminio por intercambio iónico son:

- Materia orgánica total y disuelta.
- Balance de cationes y aniones.
- Altos valores de dureza total.
- Equilibrio de cationes según afinidad a la resina seleccionada.
- Presencia de oxidantes en el agua.
- Sulfuro de hidrógeno.
- Sílice.
- Metales disueltos.
- Turbiedad y color.
- Naturaleza de la materia orgánica en el agua.

3.3 Separación por membranas

El diseño preliminar y valoración de alternativas para el caso de ósmosis inversa se realiza por medio del uso de software especializado, el cual es ofrecido por los fabricantes de las membranas. Esta herramienta se emplea para determinar la configuración más adecuada para el tratamiento particular, para posteriormente proceder a armar y cotizar un sistema. Sin una simulación previa, no se considera correcto aceptar una cotización de una planta de este tipo. Dado que este tipo de herramientas informáticas ya cuentan con una modalidad estándar de datos necesarios para los cálculos, no se presenta en detalle ese aspecto en el presente documento.

4. Consideraciones adicionales

Algunos aspectos que debe tener en cuenta el diseñador de un proyecto para tratamiento de agua con aluminio son:

- La ejecución de pruebas piloto previas permite tener un diseño con un mayor grado de optimización y certeza de su posible desempeño real. No se requiere de un insumo de tiempo y dinero muy significativo para la ejecución de una prueba a escala.

- Es necesario realizar una correcta interpretación de la calidad del agua cruda antes de pensar en un diseño, considerando incluso variaciones estacionales, protección de fuentes, parámetros adicionales, etc.
- A pesar de que los niveles N1, N2 y N3 ya están establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, es necesario considerar y medir posibles interferencias adicionales para cada proceso de potabilización.
- Es necesario acompañar el diseño de una especificación de labores de operación y mantenimiento, además del respectivo costo unitario de producción de agua potable.
- Se debe incluir necesariamente en el proceso de potabilización, el respectivo manejo de residuos, en virtud de la normativa ambiental costarricense.

5. Referencias

- Araya, R. *Diagnóstico preliminar: sistema de potabilización La Guaria*. San José: UEN Investigación y Desarrollo, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2016)

- Bruins, J. *Manganese removal from groundwater: role of biological and physico-chemical autocatalytic processes*. Delft: Delft University of Technology & UNESCO-IHE Institute for Water Education. (2016)

- Crittenden, R. *MHW's water treatment: principles and design*. 3a edición. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. (2012)

- Dow Chemical Company. *Separation of aluminum from liquid media*. Dow Water & Process Solutions. [En línea] Disponible en: https://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/periodic-table/aluminum [Accesado 10 de Setiembre del 2017]

- Hendricks, D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes.* CRC Press, IWA Publishing. Estados Unidos. (2011)

- World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: WHO. (2017)

- Voutchkov, N. *Desalination engineering: planning and design*. Estados Unidos: McGraw-Hill Companies, Inc. (2013)

Colaboradores:

Ing. Natasha Rojas Valladares **-Área funcional Investigación Aplicada-**	Tec. Rafael Orozco Campos **-Área funcional Investigación Aplicada-**
Ing. Rodolfo Araya Álvarez **-Área funcional Investigación Aplicada-**	Lic. Carla Gómez Aburto **-Región Central Oeste-**
Lic. David Cambronero Bolaños **-Laboratorio Nacional de Aguas-**	Henry Ulate Torres **-Región Central Oeste y UE RANC-EE-**
Lic. Luis Zúñiga Zúñiga **-Laboratorio Nacional de Aguas-**	Lic. Azucena Urbina Campos **-Laboratorio Nacional de Aguas-**
Ing. José Matarrita Cortés **-Región Huetar Caribe-**	Lic. Jorge Madrigal García **-Región Huetar Caribe-**
Ing. Luis Romero Esquivel **-Instituto Tecnológico de Costa Rica-**	Ing. José Araya Obando **-Instituto Tecnológico de Costa Rica-**
Ing. Jorge Merizalde Dobles **-UEN Investigación y Desarrollo-**	Personal Plantas Arsénico **-Región Central Oeste-**
Ing. Oscar Ramírez Sánchez **-Dirección Plantas Potabilizadoras GAM-**	Ing. Randall Guzmán Cambronero **-UEN Administración de Proyectos-**
Ing. José Bolaños Warner **-UEN Administración de proyectos SAID-**	Ing. Héctor Feoli Boraschi **-Unidad ejecutora BCIE-**

6. Información adicional

Ing. Andrés Lazo Páez
alazo@aya.go.cr
Director Investigación Aplicada
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados