

Capítulo 4

REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO EN FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA ABASTECIMIENTO PÚBLICO

Resumen

El hierro y manganeso presentes en las fuentes de agua subterráneas para abastecimiento público son removidos mediante un proceso no convencional de adsorción que utiliza zeolita natural tipo *clinoptilolita* recubierta con óxidos de manganeso, el cual se lleva a cabo en una columna de adsorción idéntica a un simple sistema de filtración. Dicho proceso ha sido aplicado en diversos lugares del país, tales como Guaymas y Navojoa, Son.; Veracruz, Ver.; Zihuatanejo, Gro.; Texcoco, Edo. de México; Iztapalapa, Cd. de México; Culiacán, Sinaloa y Camargo, Chihuahua. En estos lugares la concentración principalmente de manganeso en el agua cruda ha llegado a ser hasta de 2.5 mg/L y en todos los casos se han obtenido concentraciones del agua tratada que cumplen con el límite máximo permisible de 0.15 mg/L de manganeso y 0.3 mg/L de hierro, establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano. Se han construido tres plantas en el país, dos en Culiacán, Sinaloa que manejan un caudal de 40 y 55 lps respectivamente y una tercera con un caudal de diseño de 630 lps en el ramal Peñón-Textcoco estado de México. Las dos primeras plantas se encuentran actualmente operando con eficiencias promedio de remoción de manganeso del 97 % y la tercera se encuentra en etapa de pruebas de arranque con remociones promedio de 97.5 % para el manganeso y 95 % de hierro. Así mismo, se está construyendo otra planta en la ciudad de Camargo, Chihuahua, que tratará el agua proveniente de dos galerías filtrantes que contienen aproximadamente 0.9 y 0,6 mg/L de manganeso. El proceso presenta diversas ventajas comparado con cualquier otro de tipo convencional, principalmente son su alta eficiencia y menor costo de inversión y operación; largas carreras de operación debido a que la regeneración del medio de contacto (zeolita) se hace en línea de forma simultánea a la remoción de Na y Fe del agua; el proceso se regenera en continuo con la aplicación de cloro, permitiendo que siempre se mantenga una alta capacidad de adsorción del hierro y manganeso disuelto; el material adsorbente se acondiciona en el lugar usando la misma agua de la fuente a tratar sin la necesidad de adicionar otras sustancias químicas, además de la alta disponibilidad de la zeolita en México.

El mecanismo del proceso consiste en un intercambio iónico como fase inicial, donde el manganeso disuelto se fija en la superficie de la zeolita, seguido por la oxidación del manganeso sobre la superficie del medio, la cual permite la formación de una película de óxidos ($MnOx(s)$) sobre el grano del material y finalmente la remoción del manganeso disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material.

Palabras Clave: **Adsorción:** atracción o adhesión de moléculas de un gas, líquido o sustancia disuelta sobre una superficie, **oxidación:** combinación con el oxígeno y, más generalmente, reacción en la que un átomo o un ión pierde electrones, **zeolita natural:** silicato natural complejo de ciertas rocas volcánicas, la zeolita tipo *clinoptilolita* tiene la siguiente fórmula, $Na_6((AlO_2)_6(SiO_2)_{30}) \cdot 24 H_2O$, siendo el sodio el principal elemento intercambiable pero puede contener en menor proporción otros cationes como el potasio o calcio.

Introducción

En México y en el mundo gran parte de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea se ven afectadas por la presencia de hierro (Fe) y manganeso (Mn), los cuales se encuentran en forma soluble, que al oxidarse, ya sea al momento de la cloración o con el oxígeno del aire, se precipitan generando un color oscuro que provoca el rechazo de los consumidores, manchan la ropa, obstruyen tuberías, accesorios y bombas. Hasta el momento no se conocen efectos nocivos para la salud de estos elementos, sin embargo, las concentraciones elevadas de manganeso pueden acelerar el crecimiento biológico en los sistemas de distribución y contribuir a los problemas de sabor y olor en el agua, así mismo aumentan la demanda de cloro u otros oxidantes aplicados en la desinfección.

Otros de los problemas frecuentes asociados a la presencia de hierro y manganeso en el agua, es el arrastre de los óxidos depositados en los interiores de las tuberías por el mismo flujo del agua, originando una coloración negra la misma.

Las técnicas comunes empleadas para la remoción de hierro y manganeso presentan diversas limitaciones, como se mencionan a continuación:

Aireación-Filtración. El proceso de aireación-filtración se recomienda para agua con alta concentración de hierro (mayor de 5 mg/L) con el fin de disminuir los costos en reactivos. El equipo usado en este proceso incluye comúnmente un aireador, un tanque de retención y filtros. El oxígeno de la atmósfera reacciona con las formas solubles de hierro y manganeso (Fe^{+2} y Mn^{+2}) del agua cruda para producir óxidos relativamente insolubles (Fe^{+3} y Mn^{+4}) de estos elementos. La velocidad de reacción depende del pH de la solución, siendo más rápida a valores de pH altos. Ya que el manganeso tiene una velocidad de oxidación muy lenta vía el O_2 (ac) esta técnica no es muy efectiva para la remoción de Mn^{+2} , excepto a valores de pH mayores de 9.5. Para disminuir las concentraciones de manganeso al nivel deseado se requieren frecuentemente un tiempo de reacción y un tratamiento químico adicionales (Sommerfeld, 1999).

Dependiendo de las características del agua cruda puede ser necesario un tiempo de reacción hasta de algunas horas después de la aireación. Si las concentraciones de hierro y manganeso total son altas, algunas veces se usan tanques de sedimentación con dispositivos de coacción y remoción de lodos en vez de tanques de retención simples. Las principales desventajas del proceso de aireación-filtración son el costo inicial alto, y el requerimiento de un tiempo de retención y tratamiento químico adicionales si la concentración de Mn soluble del agua a tratar es mayor a 1 mg/L.

Oxidación-Filtración. El proceso de oxidación-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de productos químicos y filtros. Algunas veces se requiere un tanque de retención y un sistema de ajuste de pH con hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio o cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o carbonato de sodio (Na_2CO_3). Como agentes oxidantes pueden usarse gas cloro o hipoclorito. Este proceso opera a pH mayor o igual a 8.4, pero se tienen deficiencias en el proceso de filtración por la formación de precipitados coloidales que pasan a través del filtro (Sommerfeld, 1999).

Filtración en medios acondicionados. Los medios filtrantes acondicionados (greensand, birm, antrasand y pirolusita) para remover hierro y manganeso son de naturaleza similar, y su capacidad de regeneración, adsorción y filtración depende de la distribución de tamaño de partícula, de su forma y de los precipitados de óxidos de manganeso [$\text{MnO}_2(\text{s})$] en su superficie. Normalmente se utiliza permanganato de potasio (KMnO_4) como agente oxidante, siendo éste de costo elevado y requiere de un estricto control en su aplicación debido a su toxicidad (Sommerfeld, 1999).

Filtración directa con la aplicación de sustancias químicas. Si el Fe y Mn una vez oxidados presentan tamaños muy pequeños que no se retienen en los medios granulares de los filtros se requiere de la aplicación de sustancias químicas (coagulantes y floculantes) para aglomerar las partículas oxidadas y formar flóculos lo suficientemente grandes para ser filtrados (Sommerfeld, 1999).

Los medios filtrantes granulares deben retener sólidos suspendidos (incluyendo el Fe y Mn oxidados) con tamaño mayor a 10 μm . Un lecho filtrante diseñado adecuadamente y operando en condiciones óptimas es capaz de remover la mayoría de las partículas con tamaños de 5 a 10 μm . Las partículas menores a 5 μm normalmente pasan a través del filtro dando como resultado concentraciones residuales de Fe y Mn en el agua filtrada.

Tecnologías alternativas. El *ablandamiento* se aplica para eliminar la dureza del agua, donde la remoción del Fe y Mn es un efecto secundario. Dicho proceso consiste en elevar el pH del agua para precipitar al calcio y magnesio, originando que se oxide el Fe y Mn y coprecipiten con los carbonatos (a valores de pH mayores de 11). Este método no es muy eficiente, ya que se forman precipitados de manganeso de tamaño coloidal que pasan a través de los filtros cuando no se agregan coagulantes (Sommerfeld, 1999).

Estabilización por secuestro. Los agentes secuestrantes son productos químicos utilizados para evitar que se precipiten los metales. Normalmente, tanto el silicato de sodio como los polifosfatos se utilizan para secuestrar Fe y los polifosfatos para secuestrar Mn. Muchos polifosfatos modernos tienen una larga cadena lineal de fosfatos; el arreglo de las moléculas a lo largo de la cadena protege de ataques al material secuestrado y los sujetan durante cierto periodo de tiempo o hasta que algún otro factor rompa los enlaces. Los agentes secuestrantes no remueven al Fe y Mn, solo evitan que precipiten y se recomienda su aplicación sólo para sistemas pequeños y concentraciones menores 0.5 mg/L.

Métodos biológicos. El hierro y manganeso también pueden ser removidos biológicamente. Los tratamientos biológicos siempre requieren de calidades y condiciones específicas del agua cruda, y no todas las aguas subterráneas o superficiales son factibles económicamente de ser tratadas. Los tratamientos biológicos pueden emplearse cuando los costos de inversión y operación son menores que los de un proceso físico-químico (Sommerfeld, 1999).

Remoción *in-situ*. La remoción *in-situ* consiste en la remoción de Fe y Mn directamente en el manto acuífero para obtener un agua de buena calidad. Este proceso es relativamente nuevo y solo existen algunas instalaciones en operación en Europa y en los Estados Unidos. Consiste en disolver oxígeno atmosférico en el agua que se utiliza para la recarga del acuífero, para posteriormente ser inyectada. El agua de recarga rica en oxidante (oxígeno) causa que el Fe y Mn formen una superficie de óxidos hidratados alrededor del acuífero, creando una zona de tratamiento. Cuando se termina la recarga, el agua subterránea rica en Fe y Mn pasa a través de esta zona por efecto de la extracción por bombeo. Las superficies de óxidos hidratados adsorben los iones de Fe y Mn, reduciendo las concentraciones de Fe y Mn disueltos. Cuando la zona de tratamiento se agota (se pierde la capacidad de adsorción de Fe y Mn), se reactiva nuevamente, inyectando agua oxigenada de recarga. Los ciclos de recarga y extracción se repiten cuantas veces sea necesario. La duración de los ciclos está en función del agua extraída antes de que los niveles de Fe y Mn rebasen las concentraciones deseadas (Sommerfeld, 1999).

Intercambio iónico. Este proceso por lo general se aplica para la remoción de la dureza, utilizando resinas sintéticas operando a ciclo de sodio (Na^+). La resina intercambia el sodio por iones Ca^{+2} , Co^{+2} , Cu^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} y Mn^{+2} presentes en el agua; como resultado de este proceso se incrementa la concentración de sodio en el agua tratada. Una desventaja de este proceso son los precipitados cálcicos formados en presencia de oxígeno que bloquean los sitios de intercambio iónico, causando la saturación de la resina. Este proceso no se recomienda para la remoción de Fe y Mn ya que existe una mayor selectividad para el calcio y otros iones de mayor valencia.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha desarrollado una tecnología para remoción de hierro y manganeso disueltos, la cual se basa en la adsorción del manganeso disuelto sobre zeolita natural tipo *clinoptilolita* recubierta con óxidos de manganeso.

La técnica propuesta para la remoción de hierro y manganeso consiste en la combinación de tres procesos que se llevan a cabo en un simple sistema de filtración: 1) intercambio iónico como fase inicial, donde el manganeso disuelto se fija en la superficie de la zeolita, 2) la posterior oxidación del manganeso sobre la superficie del medio, la cual permite la formación de una película de óxidos ($\text{MnO}_x(\text{s})$) sobre el grano del material y 3) la remoción del manganeso disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material. La *Figura 1* ilustra este proceso.

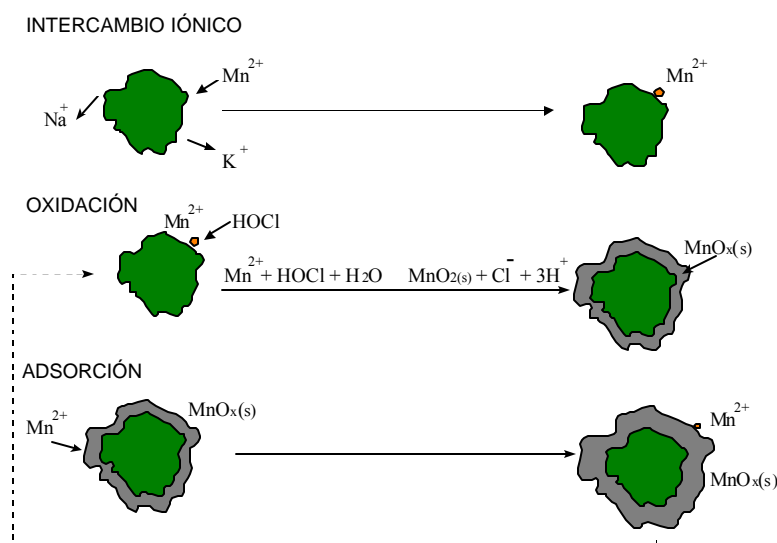


Figura 1 Etapas del proceso de formación de la capa de óxidos de manganeso.

Esta película es altamente selectiva de los iones de manganeso, Mn(II), seguida de los iones de hierro Fe(II). Oxidando el manganeso adsorbido en la superficie del grano se regenera la capacidad de adsorción del medio asegurando una continua remoción de hierro y manganeso durante la filtración.

La aplicación del oxidante en línea, en el influente del filtro, garantiza la remoción de los dos contaminantes, la regeneración del medio y largas carreras de filtración sin mermar la calidad del filtrado. Dicha tecnología presenta diversos aspectos positivos tales como: largas carreras de operación con pocas pérdidas de carga; el proceso se regenera en continuo con la aplicación de cloro, permitiendo que siempre se mantenga una alta capacidad de adsorción del hierro y manganeso disueltos, el material adsorbente se acondiciona en el lugar (in situ) sin la necesidad de adicionar otras sustancias químicas, además de la alta disponibilidad de la zeolita en México.

El proceso ha sido probado mediante estudios en campo en diversos lugares del territorio nacional: Guaymas y Navojoa, Son.; Veracruz, Ver.; Zihuatanejo, Gro.; Texcoco, Edo. de México; Iztapalapa, Cd. de México; Culiacán, Sinaloa y Camargo, Chihuahua. En estos lugares la concentración de manganeso en el agua cruda ha llegado a ser hasta de 2.5 mg/L de manganeso y en todos los casos se han obtenido concentraciones del agua producida que cumplen con el límite máximo permisible de 0.15 mg/L de manganeso y 0.3 mg/L de hierro, establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano.

El IMTA ha asesorado a la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa (JAPAC), en el diseño funcional de tres plantas potabilizadoras para remover el hierro y manganeso disueltos en agua para uso y consumo humano, en la cual se aplica la tecnología anteriormente descrita.

La primera planta se construyó en la zona denominada “La Platanera”, Sindicatura de Villa Adolfo López Mateos en Culiacán, para tratar el caudal de un pozo de 40 lps, cuyas concentraciones de manganeso van de 0.4 a 0.5 mg/L. Inició su operación en abril del año 2000, con eficiencias de remociones promedio de manganeso del 97%, obteniéndose concentraciones máximas de manganeso residual de 0.01 mg/L, diez veces inferiores al límite máximo establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

La segunda planta denominada “Campiña II” inició su operación en junio del 2001 y remueve el 98% del manganeso presente en la mezcla de dos pozos (de 1.5 a 1.8 mg Mn /L) cuya suma de gastos es de 55 lps y al igual que “La platanera”, está constituida por seis filtros a presión que operan totalmente automatizados.

Ambas plantas se empacaron con zeolita natural blanca tipo *clinoptilolita* proveniente de la región de Culiacán, con espesores de lecho de 60 y 70 cm respectivamente.

La tercer planta (en diseño) será ubicada al margen del río Humaya y tratará el agua proveniente de una batería de nueve pozos cuyas concentraciones de manganeso van de 0.19 hasta 3.7 mg/L, de los cuales seis pozos se encuentran fuera del límite máximo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano. La mezcla de los nueve pozos contiene 0.86 mg/L de manganeso y un caudal total de 225 lps.

Así mismo, el IMTA, a petición de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (GRAVAMEX) de la Comisión Nacional del Agua (CNA) diseñó una planta potabilizadora para el “Ramal Peñón-Texcoco”, en la que se aplica la tecnología antes mencionada.

La planta del “Ramal Peñón-Texcoco”, cuenta con un gasto de diseño de 630 lps, la cual operará a una tasa de filtración de 13.8 m/h en ocho filtros a gravedad, cuyas dimensiones son de 5 metros de largo por 4.10 metros de ancho con un área individual de filtración de 20.5 m² (164 m² de área total de filtración).

El medio de contacto (material filtrante) es de zeolita natural verde tipo *clinoptilolita* proveniente de las minas de Oaxaca, con una profundidad de lecho de 70 cm y un soporte de grava de 40 cm. La construcción de la planta se inició en el mes de diciembre de 1999 y se concluyó en la segunda mitad del 2001. Durante las pruebas de arranque, la planta ha operado durante periodos mayores de 24 horas, removiendo en promedio el 97.5% de manganeso y 95% de hierro.

En la ciudad de Camargo, Chihuahua como una primera fase de la transferencia de la tecnología se realizaron pruebas en las dos principales fuentes de abastecimiento, las galerías filtrantes denominadas “Las Cuatas” y “La Herradura”, en la primera se realizó una carrera de filtración de 69 horas continuas tratando un caudal de 1.17 lps removiendo el 96.27% de manganeso y el 72.41% de hierro. En la segunda se operó durante 47 horas continuas tratando un caudal de 1 lps removiendo el 94.17% de manganeso y el 72.56% de hierro. Actualmente, se diseñó y se inició la construcción de una planta que tratará el agua de ambas galerías.

Objetivo

El objetivo general de esta investigación fue básicamente *desarrollar y aplicar* una tecnología no convencional de alta eficiencia para terminar con los problemas que ocasiona el hierro y el manganeso en el agua subterránea que se utiliza para uso y consumo humano. Dicha tecnología contiene aspectos muy atractivos para su aplicación, tales como su simplicidad, economía y alta eficiencia.

Metodología

Como una primer etapa se realizaron pruebas en el laboratorio, posteriormente se aplicaron en algunos lugares que presentan tales problemas de contaminación, inicialmente se utilizaron columnas de adsorción fabricadas en acrílico de 9 cm de diámetro y en otros lugares se utilizó una planta potabilizadora móvil de un lps con adaptaciones para aplicar el cloro justo a la entrada de los filtros (ver Figuras 2 y 3). Finalmente se diseñaron las plantas a escala real para resolver los problemas que ocasionan el hierro y manganeso a los consumidores.



Figura 2. Planta potabilizadora móvil

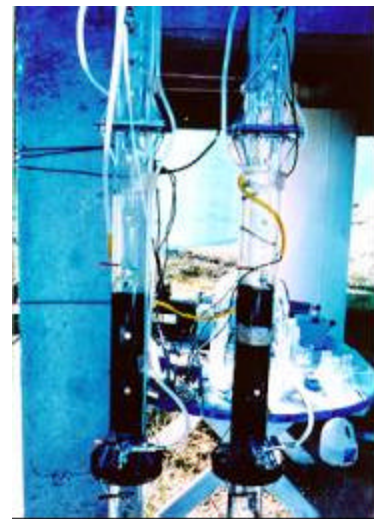


Figura 3. Columnas de acrílico

En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en los estudios piloto, la transferencia de la tecnología y las eficiencias de las plantas que se encuentran actualmente operando.

Con los estudios en laboratorio y en campo se obtuvieron los principales parámetros de diseño para las plantas potabilizadoras a escala real, siendo básicamente los siguientes:

- Tiempo de contacto:** 2 a 3 minutos
- Tamaño de grano:** 0.5 a 1.5 mm
- Tasa (velocidad) de filtración:** 10 a 15 m³/m²h
- Aplicación de cloro:** entrada de las columnas
- Dosis de cloro:** demanda + 0.5 a 1.5 mg/L
- Tiempo de retención en el sedimentador:** 1 a 2 horas
- Tasa (velocidad) de retrolavado:** 90 m³/m²h.

La tecnología se ha transferido a la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa (JAPAC), a la Comisión Nacional del Agua (CNA) y a la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Camargo, Chihuahua (JMAS).

La transferencia ha consistido en diseñar, asesorar, supervisar y evaluar la operación de las plantas, haciendo los ajustes necesarios en la operación.

El sistema de tratamiento consta básicamente de filtros columna de adsorción, un cárcamo de bombeo del agua tratada para enviar a distribución y para los retrolavados del filtro, un sedimentador para recuperar el agua de retrolavado y separar los lodos y un sistema de cloración, como se muestra en la *Figura 4*.

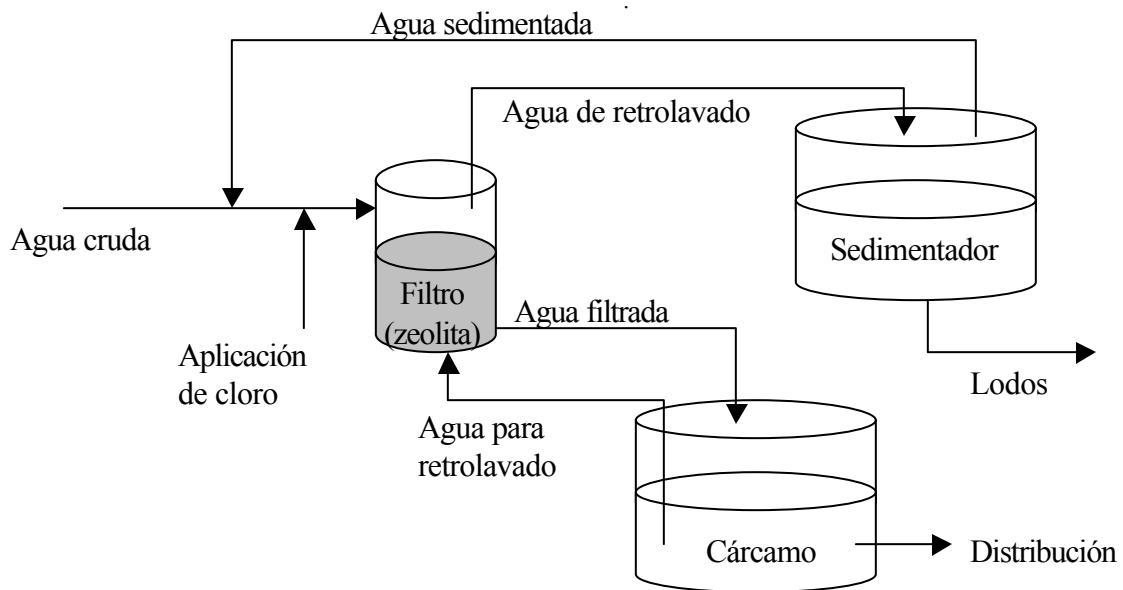


Figura 4. Sistema de tratamiento para remoción de Fe y Mn en agua para uso y consumo humano

Resultados

Estado de Sonora, México. Los primeros estudios piloto se realizaron en el agua que abastece la ciudad de *Guaymas, Sonora*, la cual presenta concentraciones promedio de manganeso de 0.5 mg/L. El sistema de abastecimiento consta de once pozos ubicados cerca de ciudad Obregón, Son. al margen del río Yaqui, y es transportada por una tubería de asbesto-cemento de 36 pulgadas de diámetro y 120 km de longitud (500 lps en 1995). Los pozos del río Yaqui presentan diferentes concentraciones de manganeso que van de 0.1 a 1.5 mg/L. Los problemas de coloración en el agua e incrustaciones en el sistema de distribución se manifiestan en mayor grado cuando hay interrupciones de energía eléctrica en los pozos, que al restablecerlos arrastran los precipitados acumulados a lo largo de la tubería llegando hasta las tomas domiciliarias. En este estudio se utilizaron las columnas de acrílico antes mencionadas (Piña, M. 1997).

El primer punto de prueba fue precisamente en uno de los pozos que aportan la mayor cantidad de manganeso al sistema y cuenta con un caudal de extracción de 100 lps (En 1995), el pozo No. 1 (Piña, M. 1997). La tasa de filtración (velocidad de filtración) varió de 13 a 15 m³/m²h, y como se observa en la *Figura 5*, al iniciar la aplicación de cloro se reduce la concentración de manganeso remanente en el efluente del filtro, hasta llegar a valores inferiores a los que establece la Norma Oficial Mexicana. La corrida de filtración fue de 54 horas y siempre se mantuvo una alta eficiencia en la remoción de manganeso. Las pérdidas de carga máximas en el filtro fueron de 36.5 cm, las cuales se reducen hasta 9.5 cm después de un retrolavado (Piña, M. 1997).

El segundo punto fue en la tubería de unión de todos los pozos (36”) “estación 100+340”. Se operó a tasas de filtración de 15 y 10 m³/m²h durante 52 horas, manteniendo siempre una concentración remanente de manganeso inferior al límite máximo permisible de Norma 127 como se muestra en la *Figura 6* (Piña, M. 1997).

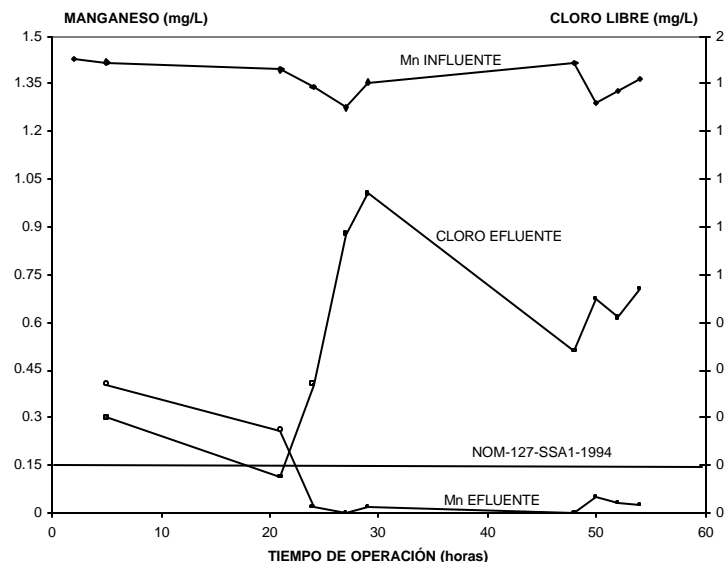


Figura 5. Remoción de manganeso y concentración de cloro en el efluente del filtro, en el pozo No. 1, Guaymas, Sonora.

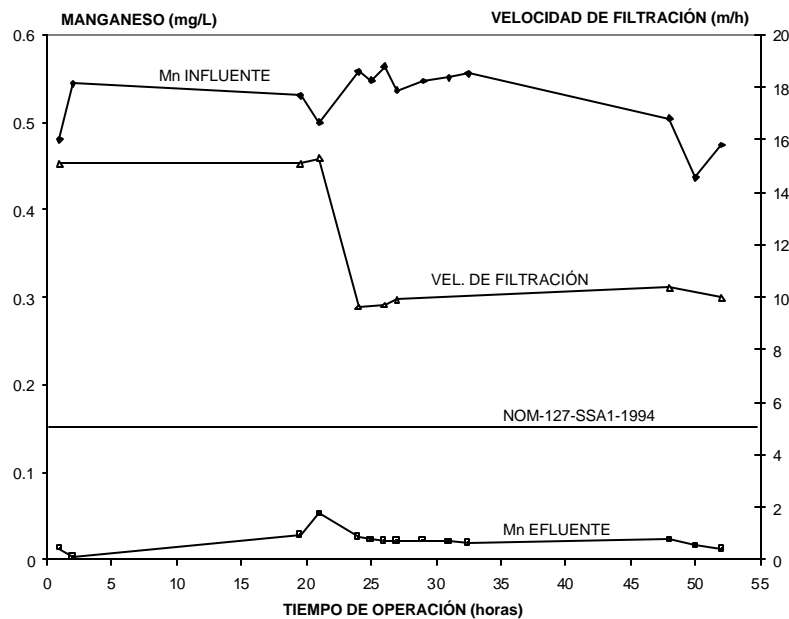


Figura 6. Remoción de Mn y velocidad de filtración en la tubería de unión de los pozos (estación 100+340), Guaymas, Sonora.

En Navojoa, Sonora se utilizó la planta potabilizadora móvil de un litro por segundo para realizar los estudios de remoción de hierro y manganeso.

Durante la estancia en la Cd. de Navojoa, Sonora se analizó la calidad del agua de los 15 pozos con los que se abastece dicha Ciudad, que suman un caudal total de 767 lps.

En general la calidad del agua de los pozos es aceptable, exceptuando aquellos con alto contenido de Mn que sobrepasan los límites máximos permisibles por la NOM-127 que establece un máximo de 0.15 mg/L como son el caso de los pozos No. 2, 3, 13, 14, 17 y 18, y otros que presentan altas concentraciones de sólidos disueltos debida a su dureza, tal es el caso de los pozos No. 6, 12, 16 y San Ignacio que sobrepasan el límite máximo permisible de 500 mg/L de dureza expresada como CaCO₃ establecido por la NOM-127.

De los 15 pozos únicamente 6 pozos llegan al tanque de bombeo y cloración denominado “Dátil”, donde una vez clorado con gas cloro a una concentración aproximada de 1.5 mg/L de cloro libre residual se bombea al sistema de distribución que abastece la zona centro de la ciudad que es la mas densamente poblada (Piña, M. 1997).

Los pozos que abastecen el tanque “Dátil” son los pozos número 2, 3, 7, 12, 13 y 14; y el mayor aportador de Mn es el pozo No. 14, además de ser el que tiene un gasto mayor (120 lps), por tal motivo se decidió tratar el agua de dicho pozo colocando la planta móvil justo antes de la entrada al tanque y se hizo un “By pass” de la tubería de llegada del pozo 14, donde el agua tratada se descargó al mismo tanque (Piña, M. 1997).

Los 9 pozos restantes abastecen de manera individual a otras poblaciones aledañas al centro de la Ciudad, en tales pozos la cloración se efectúa en línea aplicando en la mayoría de los casos hipoclorito de sodio en solución directamente en la tubería de salida de cada pozo (Piña, M. 1997).

Uno de los pozos que se cloran en línea y con mayor problema de precipitaciones de Mn (1.3 mg/L) es el pozo 17, donde el organismo operador (OOMAPAS) tiene un mayor número de quejas del poblado que se abastece de dicho pozo por el aspecto del agua y los problemas que le ocasiona a la ropa (Piña, M. 1997).

La planta operó durante 267 horas continuas y en las primeras 69 horas se aplicaron gases oxidantes generados en una celda electrolítica que utiliza sosa (NaOH) y sal común (NaCl), en el tiempo restante se aplicó hipoclorito de sodio (NaOCl) empleando una bomba dosificadora (Piña, M. 1997).

Con la finalidad de evaluar la velocidad máxima de filtración que soporta el sistema, se fue aumentado gradualmente dicha velocidad hasta alcanzar los 25.3 m/h con una concentración promedio de cloro libre residual igual a 2.57 y 1.51 mg/L en el efluente e influente respectivamente, manteniendo siempre una alta eficiencia en la remoción de manganeso, como se aprecia en la *Figura 7* (Piña, M. 1997).

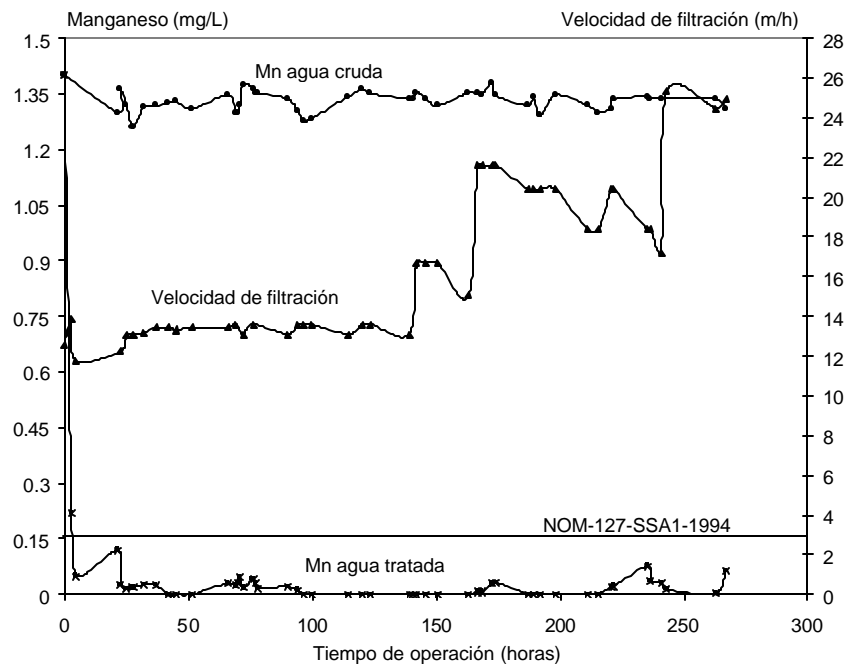


Figura 7. Remoción de manganeso y velocidad de filtración en el pozo No. 14, Navojoa, Sonora

Estado de Veracruz, México. En Veracruz, Ver. al igual que en Navojoa, Son., se utilizó la planta potabilizadora móvil de un litro por segundo y se realizaron en el pozo denominado “El Vergel”, cuya concentración de manganeso varía de 0.39 a 0.54 mg/L. La concentración de hierro en determinadas horas del día excede ligeramente el límite máximo permisible de 0.3 mg/L establecido por la Norma 127.

Como se aprecia en la *Figura 8*, durante el periodo de pruebas siempre se mantuvo al hierro y manganeso remanentes dentro de los límites que establece la Norma 127. El gasto fue de 1 a 1.1 lps (tasa de 18-20 m/h).

Estado de Chihuahua, México. En el estado de Chihuahua, las pruebas se realizaron en la ciudad de Camargo, a petición de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) y de la presidencia municipal de la misma entidad.

Se utilizó la planta potabilizadora móvil (*Figura 2*) y se trató el agua proveniente de las dos fuentes principales de abastecimiento de dicha ciudad, ambas son galerías filtrantes que se abastecen del río “Conchos”, una conocida como “Las Cuatas” y la otra “La Herradura”.

Galería filtrante “Las Cuatas”.- La planta piloto operó durante 69 horas continuas tratando un caudal de 1.17 lps y removiendo el 96.27% de manganeso. El agua cruda ingresaba con una concentración promedio de manganeso de 0.531 mg/L y se obtuvo una concentración promedio en el agua tratada de 0.023 mg/L, dicha concentración representa un

valor 6.6 veces inferior al límite máximo permisible que establece la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano, la cual fija su concentración en 0.15 mg/L.

La remoción del manganeso varió de 99.8 a 89.1% (96.27% en promedio) como se muestra en la *Figura 9*.

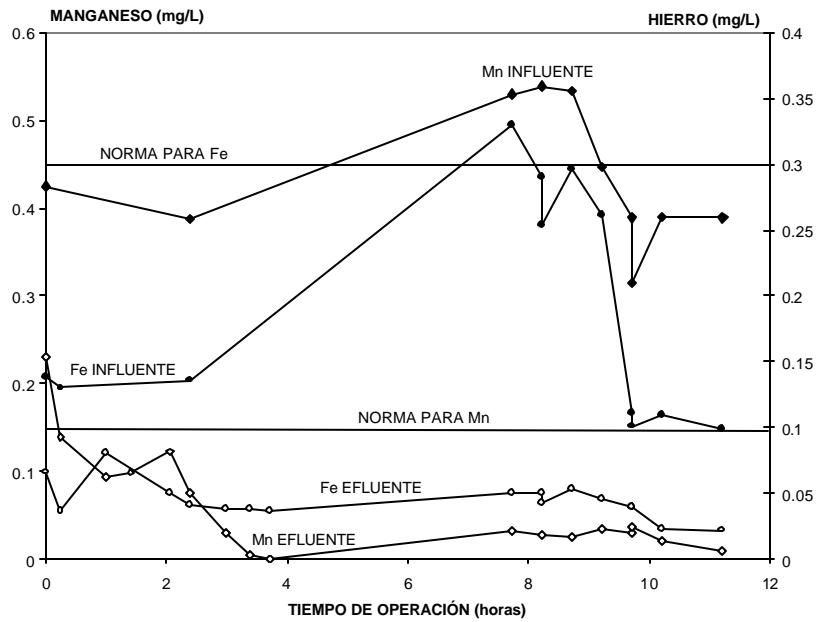


Figura 8. Remoción de Fe y Mn en Veracruz, Veracruz

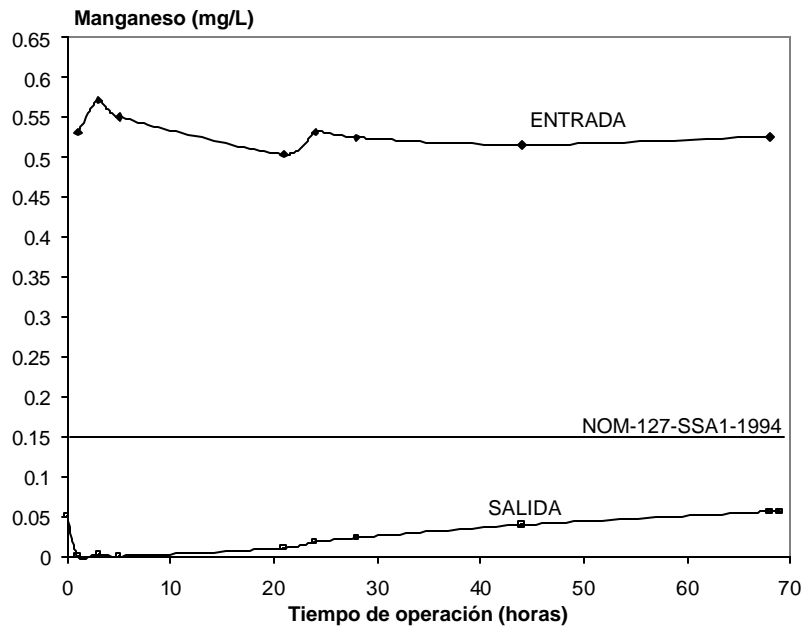


Figura 9. Remoción de Mn en la galería “Las Cuatas”.

A pesar de que la concentración de hierro en el agua cruda presenta valores muy inferiores (0.024 mg/L en promedio) al límite máximo que establece la NOM-127-SSA1-1994, en el agua tratada se obtuvieron concentraciones residuales promedio de 0.007 mg/L, representado esto el 72.41% de remoción como se aprecia en la Figura 10.

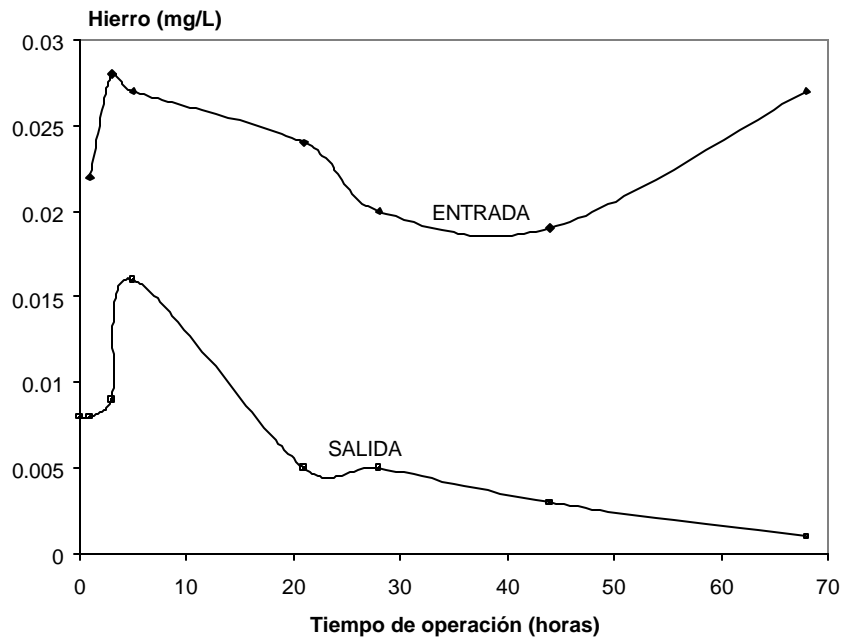


Figura 10. Remoción de Fe en la galería “Las Cuatas”

Galería filtrante “La Herradura”. La planta piloto en este sitio operó durante 47 horas continuas. Se trató un caudal de un lps, removiendo el 94.17% de manganeso, es decir, el agua cruda ingresaba con una concentración promedio de manganeso de 0.84 mg/L y se obtuvo una concentración promedio en el agua tratada de 0.041 mg/L, dicha concentración representa un valor 3.7 veces inferior al límite máximo permisible que establece la NOM-127-SSA1-1997 de agua para uso y consumo humano (Figura 11).

En el agua cruda la concentración promedio de hierro fue de 0.1 mg/L y en el agua tratada se obtuvieron concentraciones residuales promedio de 0.027 mg/L, representado esto el 72.56% de remoción (Figura 12).

Posterior a estas pruebas, se diseñó una planta potabilizadora cuya construcción se realizará en dos etapas. La primer etapa estará constituida por seis filtros cilíndricos en acero de 1.55 metros de altura útil por 1.8 metros de diámetro, los cuales operarán a presión y están constituidos por 45 toberas en el fondo, las cuales se distribuyen a través de 15 tubos de 2” de diámetro.

La parte superior de los filtros cuenta con 16 tubos de 2” para la distribución del agua de entrada. Tanto las toberas del fondo como los tubos de distribución están calculados para un gasto de agua de retrolavado de 65 lps (velocidad de 90 m/h).

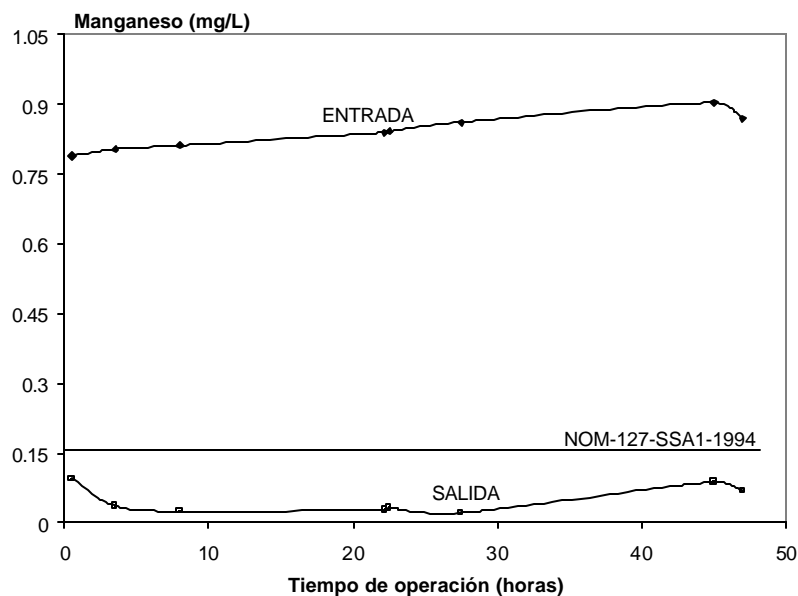


Figura 11. Remoción de Mn en la galería “La Herradura”.

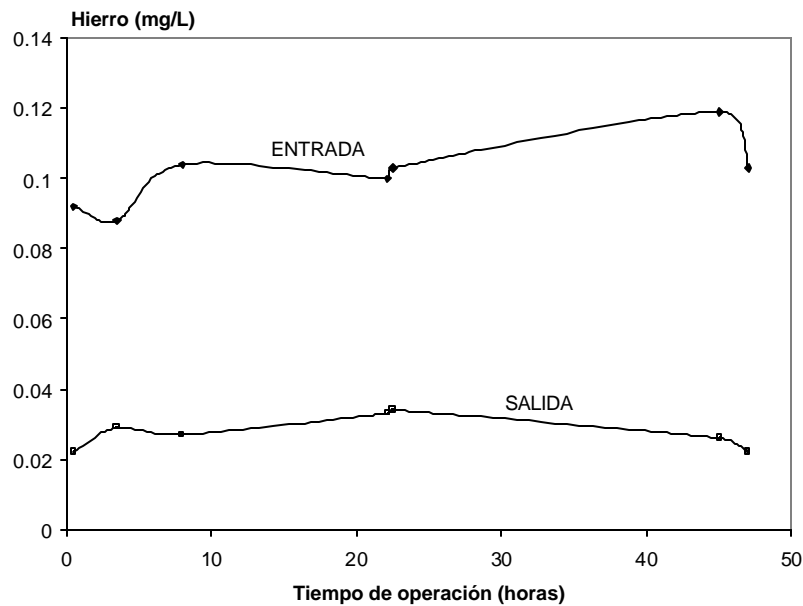


Figura 12. Remoción de Fe en la galería “La Herradura”.

Se diseñó un cárcamo de bombeo de aproximadamente 500 m³ y un sedimentador circular con una capacidad de 39 m³, esto con la finalidad de soportar 65 lps durante un tiempo máximo de 10 minutos. Cada filtro cuenta con válvulas para el control del agua filtrada y el agua de retrolavado. Los seis filtros se diseñaron para tratar un caudal de 60 lps, es decir, a una tasa de filtración de 14 m³/m²h.

La segunda etapa será incrementar el número de filtros hasta 10 para tratar un caudal de 100 lps y conservar las velocidades de filtración recomendadas.

Culiacán, Sinaloa México. Después de una etapa de pruebas, se diseñaron tres plantas potabilizadoras para remoción de hierro (Fe) y manganeso (Mn) en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. La primer planta se construyó en la zona denominada “La Platanera” (Figura 13), Sindicatura de Villa Adolfo López Mateos en Culiacán y trata el caudal de un pozo de 40 lps, cuyas concentraciones de manganeso se encuentran en un rango de 0.4 a 0.5 mg/L.



Figura 13. Planta potabilizadora “La Platanera”.

Dicha planta inició su operación en abril del año 2000, manteniendo hasta el momento, eficiencias promedio de remoción de manganeso del 97%, es decir, se obtienen concentraciones máximas de manganeso residual diez veces inferior al límite máximo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 14).

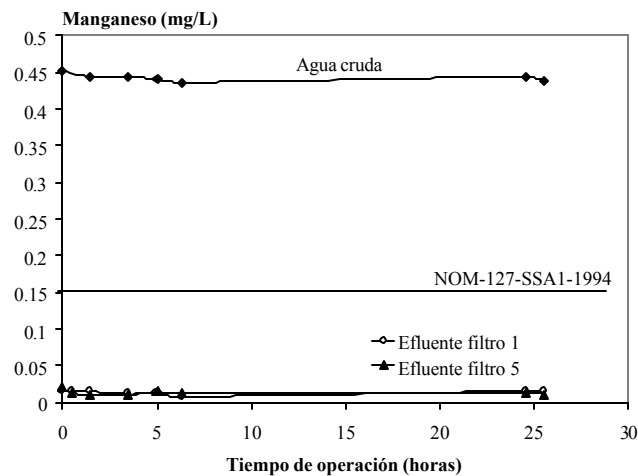


Figura 14. Remoción de Mn de los filtros 1 y 5 de la planta potabilizadora “La Platanera”.

La segunda planta denominada “Campaña II” (Figura 15) actualmente se encuentra tratando un caudal de 55 lps del agua proveniente de dos pozos, en cuya mezcla la concentración de manganeso es de 1.5 mg/L, de los cuales remueve el 98% de manganeso, es decir, se obtienen 0.03 mgMn/L como se aprecia en la Figura 16.



Figura 15. Filtros (izquierda), sedimentador, bombas y cuarto de cloración (derecha) de la planta potabilizadora “Campaña II”.

Una tercera planta (“Humaya”) se encuentra diseñada para tratar un caudal de agua de 225 lps proveniente de una batería de nueve pozos situados en la orilla del río Humaya.

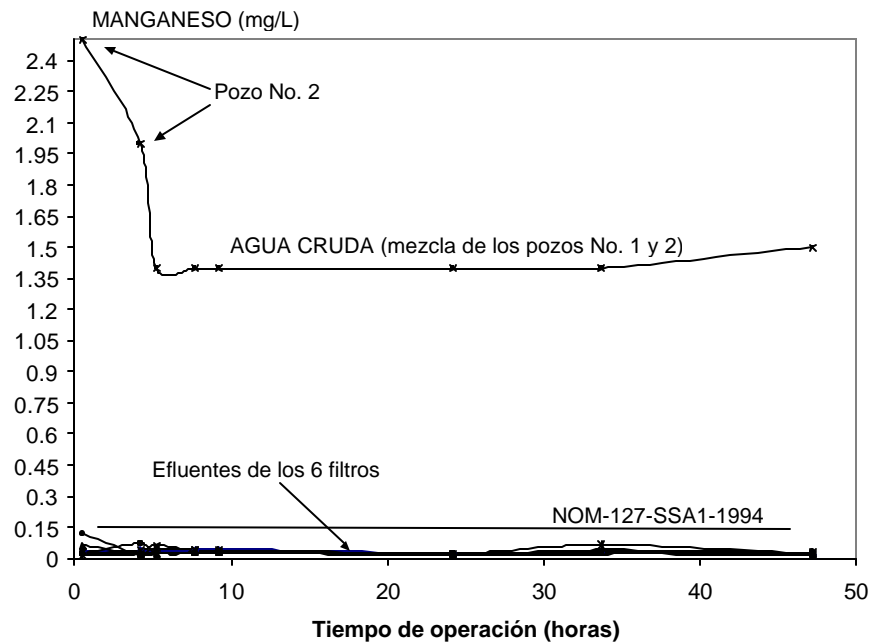


Figura 16. Remoción de manganeso en la planta “Campiña II”.

Texcoco, Estado de México. Al igual que algunos de los casos analizados anteriormente, después de un periodo de pruebas se decidió diseñar y construir una planta potabilizadora que tratará un caudal de 630 lps, como se menciona en la introducción del presente documento (Figura 17).



Figura 17. Planta para remoción de Fe y Mn del ramal Peñón-Texcoco.

La planta potabilizadora del “Ramal Peñón-Texcoco”, cuenta con un sistema de retrolavado de los filtros basado en aire y agua, cuenta además, con un sedimentador cuyo volumen funcional es de 276.75 m³, de geometría circular, con un diámetro de 12 m. El agua clarificada se bombea desde el sedimentador a la línea de agua cruda y los lodos se evacúan por bombeo a unos filtros prensa.

El sistema de abastecimiento “Ramal Peñón-Texcoco” lo constituyen 15 pozos profundos conectados a una línea de conducción que suministra agua potable a la zona norte de Ciudad Nezahualcoyotl, Edo. de México. Siete de los pozos se encuentran en plataformas dentro del lago Nabor Carrillo y ocho en los camellones de la autopista México-Texcoco, el caudal de cada pozo oscila entre 60 y 100 lps.

De los 15 pozos normalmente funcionan 11, en forma alternada, suministrando actualmente 630 lps. La capacidad de todos los pozos es mayor de 1000 lps.

La concentración de manganeso en todos los pozos se encuentra por arriba de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para agua potable, con variaciones que van de 0.16 a 4.61 mg/L, originando una mezcla cuyas concentraciones son de 0.22 mg/L de hierro y 1.52 mg/L de manganeso respectivamente, sobrepasando el límite máximo permisible establecido para el manganeso.

Durante el último año la planta ha operado de manera intermitente, se han realizado a la fecha varios intentos de arranque, y hasta el momento no se ha establecido una operación continua, los motivos son principalmente la falta de la línea nueva de conducción, que hoy en día ya está terminada, solo que el organismo operador ODAPAS por el momento no tiene la capacidad de rebombeo.

Durante el penúltimo arranque, la planta operó por un periodo mayor de 24 horas, de las 15:40 horas del 3 de octubre de 2002 hasta las 20:00 horas del día 4 del mismo mes, durante tal periodo se monitoreó la concentración principalmente de manganeso en el influente y efluente de la planta y se obtuvieron remociones promedio del 97.5% como se observa en la *Figura 18*.

De igual manera se monitoreó la concentración de cloro en el agua cruda y tratada, que presentaron bajas concentraciones de residual en el agua tratada, dando como consecuencia bajas eficiencias en algunos momentos durante la operación, como se aprecia en el punto de las 17.3 horas (*Figura 18*).

Se tomó una muestra de Fe a las 24.4 horas de operación, dando como resultado una remoción del 95.23%, es decir, el agua cruda ingresó con una concentración de 0.063 mg/L y se obtuvo en el agua tratada una concentración 0.003 mg/L.

Se tuvieron problemas con la dosificación de cloro, de ahí la irregularidad en la eficiencia del proceso, aunado a esto, se variaron los flujos en la planta, pero a pesar de todo, se demostró la alta eficiencia del proceso.

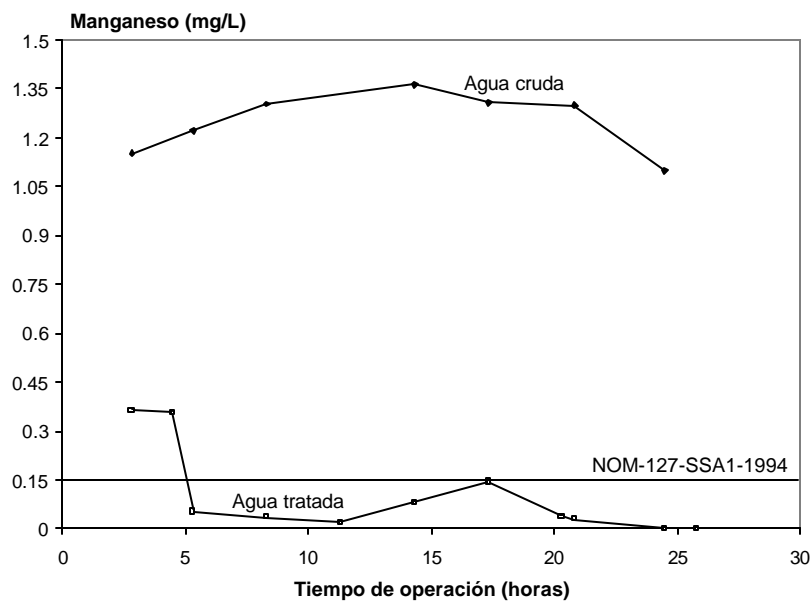


Figura 18. Remoción de Mn en la planta del ramal Peñón-Texcoco, Edo. de México.

Conclusiones

Con los resultados obtenidos en todas las pruebas se comprueba la alta eficiencia de la tecnología desarrollada por el IMTA para la remoción de hierro y manganeso disueltos, las concentraciones obtenidas en el agua tratada cumple con los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, *Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.

Para garantizar la adecuada regeneración del medio de contacto (zeolita) se debe aplicar una cantidad de cloro tal que garantice un residual de cloro libre en el efluente de los filtros de 0.5 a 1.5 mg/L. Cumpliendo con este requisito, no es necesaria una desinfección adicional en el sistema, por lo que se asegura una adecuada calidad bacteriológica como lo establece la misma Norma.

Debido a que el proceso se regenera en línea sin la necesidad de interrumpirlo, se obtienen largas carreras de operación sin afectar la calidad del efluente, garantizando un agua libre de Fe y Mn.

Los retrolavados que se le aplican a los filtros tienen la finalidad de evitar la colmatación de medio al desprender una parte importante de los óxidos formados en la superficie de la zeolita, y su frecuencia va a depender de la concentración del Fe y Mn en el agua cruda.

Al no retrolavar los filtros se reduce el área de contacto del medio filtrante propiciando una disminución de los sitios de adsorción, originando con esto una disminución en su eficiencia.

La aplicación de esta tecnología a escala real por la JAPAC y la CNA demuestra la efectividad de la misma y crea una excelente alternativa para otros organismos operadores de agua con problemas de contaminación de hierro y manganeso.

“La Platanera” resuelve un problema de más de diez años en villa Adolfo López Mateos, Culiacán.

Es un tratamiento no convencional de alta eficiencia, el sorbente es selectivo de los iones Fe(II) y Mn(II), es decir, que no existe interferencia con otros cationes, es de bajo costo en operación y mantenimiento, no genera pérdidas de carga por un sistema de adsorción y existe una alta disponibilidad de zeolita en el País.

El acondicionamiento inicial se lleva a cabo *in-situ*, sin la necesidad de aplicar otras sustancias químicas. Las eficiencias promedio de remoción del manganeso son del 97%.

Bibliografía

- AMIRTHARAJAH, A. AND CLEASBY, JOHN L (1972). “Predicting Expansion of Filters During Backwash”, *Journal AWWA, Water Technology/Quality*.
- FLORES, O., L. MANUEL Y PIÑA, S., MARTÍN (1998). “Manual de evaluación de plantas potabilizadoras”; Cap. “Filtración”. IMTA, CNA, *Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Potabilización*.
- PIÑA, S., MARTÍN. (1997) “Remoción de manganeso disuelto mediante zeolitas naturales recubiertas con óxidos de manganeso; caso de estudio”, *Tesis de grado de Maestro en Ingeniería Ambiental, UNAM, Facultad de Ingeniería*.
- PIÑA, S., MARTÍN. (1997) “Remoción de hierro y manganeso en Navojoa, Sonora”, *Informe interno de la Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Potabilización, IMTA*.
- PIÑA, S., MARTÍN., RIVERA, H., MARÍA DE LOURDES (2000) “Transferencia de tecnología para la remoción de hierro y manganeso a la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa (JAPAC)”, *Informe interno de la Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Potabilización, IMTA*.
- PIÑA, S., MARTÍN., RAMÍREZ, G., ANTONIO (2001) “Remoción de hierro y manganeso en fuentes de agua para abastecimiento público, en Camargo, Chihuahua” *Informe interno de la Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Potabilización, IMTA*.
- PROYECTO EJECUTIVO de la planta de remoción de manganeso del ramal Peñón-Textcoco, Estado de México” (1997). Convenio: GRAVAMEX-IMTA, V2; *Informe Final*, Vol. II, Tomo 5, Memoria de Cálculo.
- SOMMERRFELD, ELMER O. (1999) “Iron and Manganese Removal Handbook”, *American Water Works Association*.