

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN CON CLORURO FÉRRICO PARA REMOVER ARSÉNICO DE AGUA SUBTERRÁNEA

María de Lourdes Rivera Huerta ^{1*}

Sara Pérez Castrejón ¹

Alejandra Martín Domínguez ¹

Silvia Gelover Santiago ¹

Areli Gómez Rojas ²

Carlos Hernández Yáñez ³

TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF COAGULATION WITH
FERRIC CHLORIDE TO ARSENIC REMOVAL OF GROUNDWATER

Abstract

Coagulation using ferric chloride followed by flocculation, sedimentation and filtration is an excellent alternative treatment to remove arsenic from drinking water. This paper presents results of a pilot-scale study conducted with groundwater from a well in Torreon, Coahuila, Mexico. The concentration of arsenic in water was 67 µg/ L. At doses of 8.5 mg/L of iron (coagulant) and 0.2 mg/L of an anionic polymer it was possible to obtain an arsenic removal efficiency of 93% and 98% of added iron. The concentration of dissolved solids and pH value of treated water compared to raw water did not change significantly. The sludge generated in the process may be thickened and disposed of in a landfill as it is not a hazardous waste. The cost of treatment per cubic meter was 0.0942 USD, this price includes the cost of reagents and energy.

Key Words: arsenic removal, coagulation, treatment cost

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Potabilización

² Consultora Independiente

³ Fondo Metropolitano de La Laguna

*Corresponding author: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México. Tel.: +52(777)3293600. Fax: +52(777)3194381. Email: lriviera@tlaloc.imta.mx

Resumen

El proceso de coagulación usando cloruro férrico seguido de floculación, sedimentación y filtración, es una excelente alternativa de tratamiento para remover arsénico de agua para consumo humano. En este trabajo se muestran resultados de un estudio a escala piloto realizado con agua subterránea de un pozo de la ciudad de Torreón, Coahuila, México. El agua contenía 67 $\mu\text{g/L}$ en promedio de arsénico. Aplicando 8.5 mg/L de hierro (coagulante) y 0.2 mg/L de un polímero aniónico, fue posible obtener una eficiencia de remoción de arsénico de 93% y del hierro adicionado del 98%. La concentración de sólidos disueltos y el valor de pH del agua tratada con respecto al agua cruda no sufrieron cambios significativos. Los residuos generados en el proceso pueden ser espesados y dispuestos en un relleno sanitario, ya que éstos no son considerados residuos peligrosos según una prueba CRIT (Corrosividad, Reactividad, Inflamabilidad y Toxicidad). El costo de tratamiento por metro cúbico fue de 0.0942 USD, este precio incluye el costo de reactivos y energía eléctrica consumida en el proceso.

Palabras clave: coagulación convencional, costo de tratamiento, escala piloto, remoción de arsénico.

Introducción

Actualmente se tienen varias opciones tecnológicas para remover arsénico del agua, entre ellas se encuentran la adsorción en medios específicos, el intercambio iónico en resinas sintéticas y los procesos de membranas como nanofiltración u ósmosis inversa (Cheng *et al.*, 1994). Sin embargo, los métodos fisicoquímicos siguen siendo los más empleados principalmente por su menor costo y la relativa facilidad de adaptación y operación del proceso.

La coagulación convencional ha sido utilizada tradicionalmente para remover sólidos del agua con fines de uso y consumo humano y sigue siendo uno de los procesos más utilizados en la potabilización de agua en México (CONAGUA, 2009). Sin embargo, contaminantes inorgánicos disueltos tales como el arsénico pueden removerse durante la coagulación con sales de aluminio o sales férricas principalmente a través de adsorción (asociación del contaminante con la superficie del precipitado) y oclusión (atrapamiento del contaminante adsorbido en el interior de los flóculos en crecimiento) (Hering *et al.*, 1996).

La remoción de arsénico en un proceso de coagulación química se lleva a cabo principalmente por el mecanismo de adsorción (mediante la asociación del arsénico disuelto con la superficie del oxi-hidróxido precipitado), en donde el coagulante principalmente a base de hierro se hidroliza en el agua para formar hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), que tiene una carga neta positiva en la superficie de las partículas formadas. Por otra parte, el arsenato es un anión con carga negativa, y se adsorbe en las partículas de carga positiva, en este caso del $\text{Fe}(\text{OH})_3$, por reacciones de complejación superficial (Ghurye G. *et al.*, 2004). Los coagulantes a base de Fe^{3+} son más eficaces en la remoción de As^{+5} , que aquellos a base de aluminio; así como también son más eficaces para la remoción de As^{+3} (Thirunavukkarasu *et al.*, 2001; Gregor, 2001; Borho y Wilderer, 1996). Esto se debe principalmente a las constantes de disociación y a la estabilidad del flóculo (Brewster y Lashinger, 1991, Mc Neill y Edwards, 1997).

La eficiencia de eliminación de As^{+5} , dentro del intervalo de 0.1 a 1 mg /L es alrededor de 95 a 98 %, sin embargo la concentración residual es superior a 10 μg /L. Para As^{+3} el rendimiento varía entre 50 y 60 %, esto se explica por la baja capacidad del Fe^{+3} de enlazar al As^{+3} , principalmente debido a la carga superficial nula de la especie predominante de As^{3+} (Smedley y Kinniburg, 2002). Esto implica la necesidad de una oxidación preliminar completa del arsenito a arsenato (Subramaniam *et al.*, 1997).

Los factores que influyen sobre el desempeño de la coagulación para remover arsénico son el pH de la solución, el tipo y dosis de coagulante, la fuerza iónica, el estado de oxidación de las especies de arsénico (Amy *et al.*, 2000), además de los parámetros operacionales de los procesos de coagulación y floculación en general, como son los tiempos y gradientes de velocidad en el mezclado.

Los principales componentes de una planta de tratamiento con un proceso de coagulación química son sistemas de dosificación de productos químicos, una unidad de mezclado rápido en el que se lleva a cabo la coagulación, una unidad de floculación o mezcla lenta, una unidad de sedimentación, filtros generalmente de lechos granulares, equipo para el manejo de lodo e instalaciones para efectuar el retrolavado de filtros y la recuperación del agua de retrolavado. El sedimentador puede no ser necesario en situaciones donde la concentración de partículas en el influente es muy baja.

Por otro lado, pocos estudios llevan a cabo pruebas a escala piloto para verificar las eficiencias reales de remoción con altas concentraciones de arsénico en sitio (Cheng *et al.*, 1994, Tubic' *et al.*, 2010). Este tipo de pruebas son indispensables para realizar un análisis técnico y económico que permita evaluar la factibilidad de implementar la tecnología a escala real.

Objetivo

Evaluar el proceso de coagulación con cloruro férrico, floculación, sedimentación y filtración, para la remoción de arsénico del agua a escala piloto, en una fuente de abastecimiento subterránea de la Comarca Lagunera, con la finalidad de obtener información de la eficiencia del proceso y los costos de operación asociados.

Metodología

El estudio se realizó en el pozo 32R de la ciudad de Torreón Coahuila, México (coordenadas 25° 30' 59.62" N, 103° 24' 00.66" O) y se utilizó una planta piloto operada a un caudal de 0.25 L/s. El tren de tratamiento en la planta piloto se basó en el proceso de clarificación con la aplicación de cloruro férrico como coagulante. En etapas avanzadas de la prueba se agregó un floculante

para analizar si se podía disminuir la dosis de coagulante. La mezcla rápida se realizó en línea mediante un mezclador estático (placa de orificios) y las etapas de floculación y sedimentación se llevaron a cabo en una unidad de contacto de sólidos con recirculación interna de lodo, también llamado clarifloculador, que acelera las reacciones químicas y promueve el crecimiento de flóculos densos. La planta incluye dos filtros a presión y flujo descendente, con lecho filtrante conformado por arena sílice, así como un medidor de energía (multímetro digital marca Lovato modelo DMK40), el cual permitió establecer el consumo energético real de la planta por metro cúbico de agua tratada. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el tren de tratamiento piloto que se utilizó en este estudio.

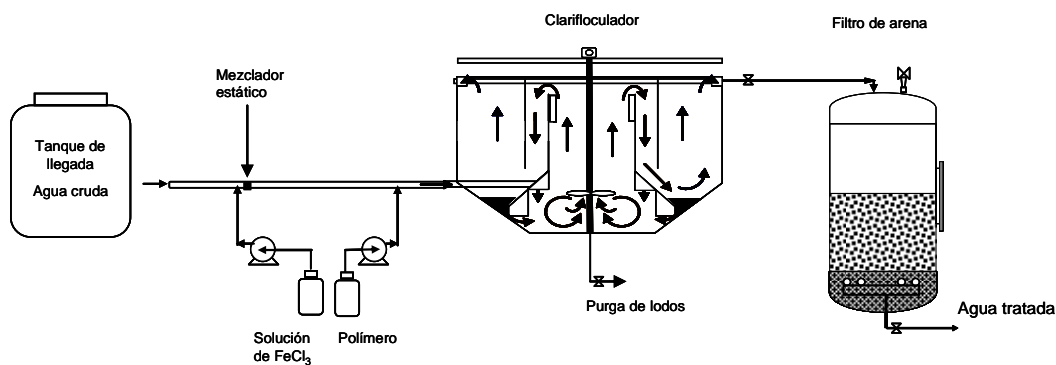


Figura 1. Tren de tratamiento piloto

Antes de iniciar las pruebas en sitio se realizó la caracterización del agua del pozo en estudio para conocer la concentración de arsénico total y algunos parámetros fisicoquímicos de interés. Para determinación de estos parámetros se utilizaron los métodos estandarizados APHA (American Public Health Association). El estudio piloto se realizó del 2 al 8 de septiembre de 2009.

Las condiciones de operación se fijaron con base a estudios previos realizados por Rivera *et al.* (2007) con agua de pozo adicionada con arsénico, en donde se llevaron a cabo ensayos a escala laboratorio para conocer las principales variables que influyen en el proceso de coagulación aplicado a la remoción de arsénico, así como el intervalo óptimo para lograr la mayor eficiencia del proceso. Los principales resultados de ese estudio mostraron que una dosis de 10 mg/L de hierro (a partir de FeCl_3) es suficiente para remover entre 100 y 500 $\mu\text{g/L}$ de arsénico; valores de pH del agua a tratar entre 6.5 y 7.0 promueven la remoción de arsénico; valores en la coagulación del producto *Gradiente en el mezclado x tiempo de residencia* (conocido como Gt) cercanos a 10,000 y gradientes de floculación (conocido como G), entre 40 y 170 s^{-1} en la etapa de floculación, optimizan la formación del flóculo y por lo tanto la remoción de arsénico.

Así para las pruebas en sitio a flujo continuo, la dosificación inicial de hierro fue de 10 mg/L, una concentración ampliamente explorada en el laboratorio como ya se mencionó, misma que aseguraba la remoción de arsénico. Después de 40 h de prueba, se decidió explorar el uso de una dosis mayor de coagulante (12 mg/L de Fe) con el objetivo de generar una mayor cantidad de flóculos precipitables en la clarificación y determinar su efecto en la remoción de arsénico. Posteriormente se exploraron dosis del coagulante un 10 y 15 %, (9 y 8.5 mg/L de Fe respectivamente) menores que la inicial sin y con polímero, respectivamente, buscando el ahorro de reactivos que siempre es deseable desde el punto de vista económico. Esta exploración fue limitada debido a las restricciones de tiempo concomitantes a una prueba en campo. El tipo y dosis de polímero también fueron probados previamente en laboratorio.

El coagulante utilizado fue cloruro férrico en solución al 40% y como ayudante de floculación un polímero aniónico de Kemira (Superfloc[®] A-100 PWG) aprobado por la NSF International para su uso en agua potable (National Sanitation Foundation renombrada como NSF International en 1990). La carga superficial de sedimentación se mantuvo constante para todas las pruebas a 15 m³/m²d y la tasa de filtración en un intervalo de 9 – 10.5 m³/m²h. La tasa de retrolavado de los filtros fue de 41 m³/m²h. En la

Tabla 1 se muestran las condiciones de operación de la planta piloto.

Tabla 1. Condiciones de operación en el estudio

SITIO	CONDICIONES DE OPERACIÓN
Pozo 32R. Torreón, Coah. (2-8 Sep de 2009)	Q= 15 L/min, Fe dosificado=10 mg/L. Sin polímero.
	Q= 15 L/min, Fe dosificado=12 mg/L. Sin polímero.
	Q= 15 L/min, Fe dosificado=9 mg/L. Sin polímero.
	Q= 15 L/min, Fe dosificado=8.5 mg/L. Polímero =0.2 mg/L

Para monitorear el proceso se tomaron muestras de agua en los siguientes puntos: 1) tanque de llegada del agua cruda para conocer la concentración de arsénico, pH y conductividad; 2) después de la adición de coagulante para verificar la cantidad de hierro adicionado; 3) efluente del sedimentador y 4) efluente del filtro para cuantificar hierro y arsénico residual, pH y conductividad.

Los métodos de análisis del agua fueron los siguientes: para la medición de hierro se utilizó un colorímetro portátil Marcha Hach, Modelo DR/890. El hierro se midió usando el método FerroVer[®] que mide hierro total, con límite de detección = 0.03 mg/L. Para la medición de arsénico se utilizaron dos métodos, en campo se usó el equipo Wagatech Arsenator[®] con rangos de medición de 2 a 100 µg/L, el método es una modificación del método Gutzeit, el cual detecta

arsénico total mediante la reducción de éste al gas arsina (AsH_3) y se obtienen resultados en 20 minutos. En una evaluación de desempeño del equipo se compararon resultados contra absorción atómica por generación de hidruros, y como resultado se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.998 (Shriram Institute for Industrial Research, 2006). El método Arsenator® ha sido seleccionado por la UNICEF para la cuantificación del arsénico, por su fácil manejo en campo (Britt, 2003). Para la validación de los resultados obtenidos en campo en el presente estudio, se analizaron algunas muestras en un laboratorio externo certificado con el método normalizado de espectrometría de masas con plasma inductivamente acoplado ICP-MS (EPA6020A-2007) con un límite de detección de $2 \mu\text{g/L}$ y un límite de cuantificación de $5 \mu\text{g/L}$.

La conductividad se determinó con un conductímetro de campo marca Hach modelo *Sension 5* y el pH con un potenciómetro de campo marca Hach modelo *Sension 1*.

La evaluación del proceso se enfocó desde el punto de vista técnico al análisis de la eficiencia para la remoción del arsénico después de la etapa de sedimentación y en el efluente del filtro, en la remoción del coagulante (hierro) adicionado, las condiciones de pH y conductividad del agua tratada y la cantidad de agua aprovechada con respecto a la alimentada a la planta. A la vez se determinó el costo de los insumos incluyendo la energía.

Resultados

Las características promedio del agua del pozo 32R en el período en el que se realizaron las pruebas fueron: temperatura ($^{\circ}\text{C}$) = 25.06, pH = 7.63, conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) = 928.5, Sólidos disueltos totales (mg/L) = 463.12, Alcalinidad total (mg/L como CaCO_3) = 123.06, Hierro (mg/L) = 0.06, Arsénico ($\mu\text{g/L}$) = 67.

En el estudio sólo se midió arsénico total, no se cuantificó la concentración por especie. Sin embargo estudios realizados por Del Razo *et al.* (1990) en la Comarca Lagunera donde determinaron los estados de oxidación del arsénico contenido en muestras de agua de 128 pozos encontraron que en el 93% de las muestras el As (V) fue la especie predominante. Y otro estudio realizado en la misma zona, reporta que a través de cálculos termodinámicos con datos del agua subterránea se encuentra que la especie predominante de arsénico es As (V) (Garrido *et al.*, 2006). Por lo anterior no se consideró necesario el análisis del arsénico por especie ni tampoco la adición de un oxidante en el proceso antes de la adición del coagulante. En la Figura 2 se presentan las concentraciones de hierro (Fe) y arsénico (As), obtenidas en campo en los efluentes del sedimentador y del filtro durante la evaluación de la planta piloto, en función del tiempo y de la dosis de coagulante aplicado. Se dividen con líneas verticales los períodos en los que se trabajó a diferentes dosis promedio de coagulante y floculante.

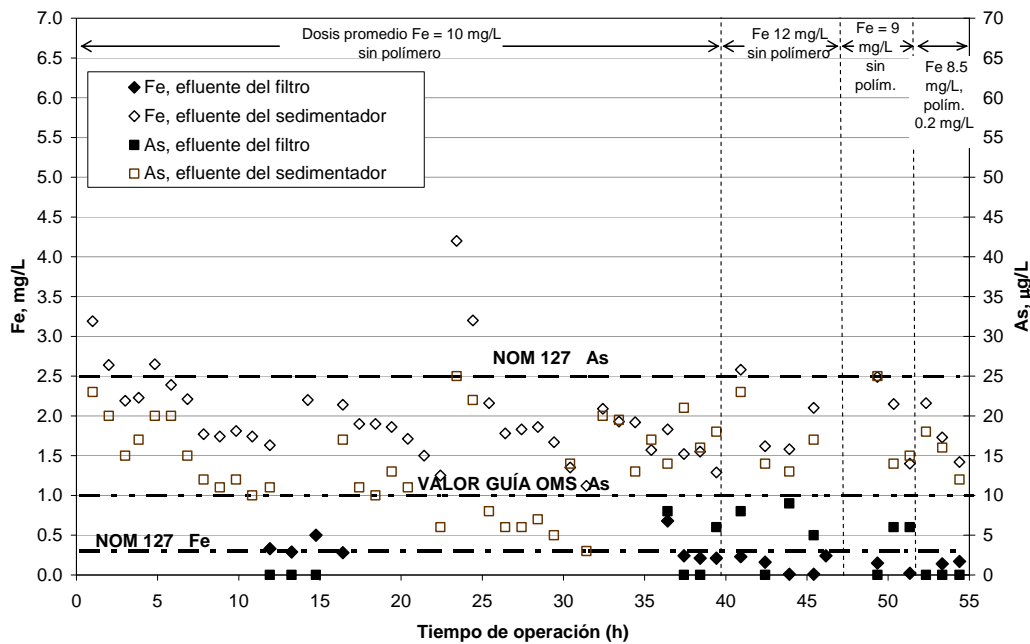


Figura 2. Concentraciones de hierro y arsénico en los efluentes del sedimentador y del filtro en función del tiempo de operación, para diferentes dosis de coagulante y floculante. Concentración de As inicial promedio = 67 µg/L.

Dado que las especies de arsénico que se remueven del agua mediante el proceso en estudio lo hacen vía adsorción en la superficie de las especies precipitadas de hierro, o en el interior de los flóculos en crecimiento, las eficiencias de remoción de estos dos elementos en el proceso de sedimentación y filtración están relacionadas en forma directa. En la misma Figura 2 se observa que si la unidad de tratamiento (sedimentador o filtro) es eficiente para remover el hierro, entonces también lo será para remover el arsénico.

La concentración de arsénico en el efluente del filtro logró en todo momento cumplir con el límite permisible de 25 µg/L para agua destinada a uso y consumo humano, que establece la NOM 127 SSA1-1994 (Modificación del año 2000) y con el valor guía de 10 µg/L que sugiere la OMS (Organización Mundial de la Salud) para agua de bebida.

Por otro lado, si bien se requiere agregar una cierta dosis de coagulante al agua para lograr la remoción de arsénico, es indiscutible que este producto no debe traer efectos adversos a la calidad del agua. Por lo anterior, la concentración de hierro en el efluente es una variable que tiene que ser vigilada ya que el mismo proceso de tratamiento debe ser eficiente para removerlo en su totalidad o por lo menos para que la concentración residual no exceda el límite permisible de 0.3 mg/L que establece la NOM 127 SSA-1994 (Modificación del año 2000). A excepción de algunos puntos en el primer período (en el que se usó como dosis de coagulante

10 mg/L de hierro) en el resto de la prueba fue posible obtener concentraciones de hierro residual inferiores a los 0.3 mg/L

En el último período de trabajo se observa que aplicando 0.2 mg/L de floculante se puede bajar la dosis de hierro a 8.5 mg/L logrando de hecho, la mejor eficiencia de remoción de arsénico. Algunas de las muestras medidas con el Arsenator® dieron como resultado 0 µg/L y al medirlas con el método ICP-MS su concentración fue inferior al límite de cuantificación que es de 5 µg/L. Considerando lo anterior todas las determinaciones que con Arsenator® dieron cero se consideraron igual a 5 µg/L con el propósito de poder hacer un cálculo confiable de la eficiencia de remoción de arsénico.

El agua extraída del pozo 32R tenía un valor promedio de pH de 7.6. Esta es una condición apropiada para llevar a cabo el tratamiento de coagulación para remover arsénico sin el ajuste previo de las condiciones ácido base del agua. Debido al consumo de alcalinidad del agua provocado por las reacciones de formación de hidróxidos férricos, el pH del efluente de la planta se acidificó ligeramente dejando el agua a valores de pH cercanos al neutro, valor promedio 7.08, y dentro del intervalo de 6.5 a 8.5 que establece para este parámetro de calidad la NOM 127 SSA1-1994, modificada en el año 2000.

Por otro lado la conductividad eléctrica del agua tratada aumenta alrededor de 25 µS/cm con respecto al agua alimentada a la planta, lo que representa 12.5 mg/L de SDT. Esta cantidad de SDT significa un aumento del 2.7% con respecto al contenido original en el agua cruda y no tiene mayor repercusión en la calidad del agua. El análisis CRIT (Corrosividad, Reactividad, Inflamabilidad y Toxicidad) practicado a una muestra de lodos generados por el proceso y espesados durante 14 horas, no presenta indicio de alguna de las características para considerarlo material peligroso según la NOM-052-SEMARNAT-2005. No se detectó arsénico en el extracto PECT (Prueba de extracción para compuestos tóxicos) de la muestra, por lo que estos residuos pueden ser espesados y dispuestos en un relleno sanitario.

Los costos de operación considerados en este análisis incluyen la energía consumida por: bombeo, agitación y filtración, además de los reactivos utilizados (coagulante y polímero). Los consumos de energía en el proceso se presentan en la

Tabla 2, el consumo de energía de las bombas dosificadoras se consideró despreciable.

Tabla 2. Consumos de energía

Bombeo de agua cruda	Agitación en el floculador	Bombeo Filtración
(KWh)	(KWh)	(KWh)
0.162	0.095	0.252

Los costos se calcularon originalmente en pesos mexicanos y posteriormente se convirtieron a dólares americanos. El tipo de cambio usado fue de 12.7 pesos por dólar, paridad del 13 de agosto de 2010. Los costos de los insumos del proceso se muestran en la Tabla 3, el precio considerado para la energía eléctrica corresponde al de la región en la que se realizó el estudio.

Tabla 3. Costos de insumos

Insumo	Costo
Cloruro férrico (40%)	\$ 0.486 USD/Kg
Polímero	\$ 3.5 USD/Kg
Energía eléctrica	\$ 0.105 USD/KWh

En la tabla 4 se presentan datos promedio de costo de operación por metro cúbico de agua tratada para las condiciones probadas y sus respectivas eficiencias

Tabla 4. Costos de operación para las condiciones de prueba.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	Consumo de energía (USD/m ³)	Consumo de Fe (USD/m ³)	Consumo de polímero (USD/m ³)	Costo de operación (USD/m ³)	% Rem As	%Rem Fe
Fe dosificado=10 mg/L. Sin polímero.	0.064	0.0345	0	0.0985	91.7	96.5
Fe dosificado=12 mg/L. Sin polímero.	0.064	0.0401	0	0.1041	90.7	98.8
Fe dosificado=9 mg/L. Sin polímero.	0.064	0.0311	0	0.0951	92.2	99.2
Fe dosificado=8.5 mg/L. Polímero =0.2 mg/L	0.064	0.0295	0.0007	0.0942	93.1	98.1

Conclusiones

Las condiciones de dosificación más favorables para la remoción de arsénico en el pozo 32R de Torreón fueron 8.5 mg/L de hierro como coagulante a partir de cloruro férrico y 0.2 mg/L de polímero aniónico Superfloc A-100 PWG. Estas condiciones permiten obtener la remoción de arsénico más alta al costo más bajo, \$0.0942/m³, el precio incluye el costo de reactivos y energía. Las eficiencias de remoción de hierro y arsénico fueron del 98 y 93 % respectivamente. Se recomienda realizar otras pruebas para analizar la posibilidad de disminuir aún más la dosis de coagulante lo que traería como beneficio la disminución del costo del tratamiento.

La efectividad de remoción de arsénico por coagulación es alta ya que para cualquiera de las condiciones probadas en el estudio, el efluente producido cumplió con el límite máximo permisible de 25 µg/L para arsénico establecido por la Modificación del año 2000 de la NOM 127 SSA1-1994, e incluso fue menor al valor guía para este metaloide propuesto por la OMS en agua para bebida.

La disminución del pH fue como máximo de 0.4 unidades respecto al agua cruda alimentada al proceso quedando en un valor de 7.0 y el aumento en la concentración de sólidos disueltos totales en el agua tratada fue del 2.7 % respecto al agua alimentada a la planta. Ninguno de estos efectos causa un cambio sustancial en la calidad del agua por lo que el efluente de la planta cumple con las características necesarias para considerarse apta para uso y consumo humano.

Los residuos generados en el proceso pueden ser espesados y dispuestos en un relleno sanitario ya que no son considerados residuos peligrosos.

Referencias bibliográficas

- Amy, G., Edwards, M., Brandhuber, P., McNeill, L., Benjamin, M., Vagliasindi, F., Carlson, K, Chwirka, J. (2000). *Arsenic Treatability Options and Evaluation of Residuals Management Issues*. AWWA Research Foundation, AWWA, 47-72.
- Borho, M. and Wilderer, P. (1996). Optimized removal of arsenate(III) by adaptation of oxidation and precipitation processes to the filtration step. *Water Science and Technology* Vol 34 No 9, 25–31 IWA Publishing
- Brewster, M. D., Lashinger, M.N. (1991). Arsenic removal using electrochemically generated iron in conjunction with hydrogen peroxide addition. *46th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings*, 339-346.
- Cheng, R. C., Liang, S., Wang, H-Ch., Beuhler, M.(1994). Enhanced coagulation for arsenic removal. *JAWWA*, **86**, (9).79-90.
- CONAGUA (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.
- Del Razo L.M., Arellano M.A. & Cebrián M.E. The oxidation States of Arsenic in Well-Water from a Chronic Arsenicism Area of Northern Mexico. *L. M. Environmental Pollution* 64(1990) 143-153
- Erickson, Britt E. Field kits fail to provide accurate measure of arsenic in groundwater. *Environmental Science & Technology*. January 1 2003. páginas 31A – 35A.
- Garrido, S., Avilés, M., Pargaru, I., De La Paz, J., Segura, N. Pruebas de tratabilidad para remoción de arsénico del agua de suministro municipal de Gómez palacio, Dgo., utilizando el sistema DESEL. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Proyecto TC-0715.21, Nov. 2006.
- Ghurye G., Clifford D., Tripp A. (2004). Iron coagulation and direct microfiltration to remove arsenic from groundwater. *American Water Works Association Journal*. Denver: Apr 2004. Tomo 96, N° 4.
- Gregor, J., 2001. Arsenic removal during conventional aluminum-based drinking-water treatment. *Water Res.* 35, 1659–1664.
- Hering, J; Chen, P; Wilkie, J; Elimelech, M and Liang, S. (1996). Arsenic Removal by Ferric Chloride. *JAWWA*, **88**, (4), 155-167.
- Mc Neill, L. S. Edwards, M. (1997). Predicting As removal during metal hydroxide precipitation. *Journal American Water Works Association*, 89: 75-86.

- Modificación a 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. Diario Oficial de la Federación , 22 de noviembre de 2000.
- Rivera, M. L., Piña M., Martín-Domínguez, A., Pérez S., y García, E. Tecnologías de remoción de arsénico, Tercera etapa, Parte: Electrocoagulación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe Final, Proyecto TC0707.1
- Shiriram Institute for Industrial Research. Project No. ENV-388, 2006. Wagtech Arsenator Evaluation. [En línea] <http://www.wagtech.co.uk/system/uploads/attachments/0000/3932/Arsenator_Evaluation_UNICEF-India.pdf >
Consultada el 14 de abril de 2011.
- Smedley, P. L.; Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517-569
- Subramanian, K. S.; Viraragavan, T.; Phommavong, T.; Tanjore, S. (1997). Manganese Greensand for removal of arsenic in drinking water. *Water Quality Research*. 32: 551-561. Canadá.
- Thirunavukkarasu, O.S., Viraraghavan, T. et Subramanian, K.S. (2001). Removal of arsenic in drinking water by iron oxide-coated sand and ferrihydrite - Batch studies. *Water Qual. Res. J. Can.*, 36(1), 55-70.
- Tubic', A., Dalmacija, B., Agbaba, J., Ivancev-Tumbas, I., Klasnja, M. and Dalmacija, M. (2010). Tracking disinfection by products and arsenic removal during various drinking water treatment trains. *Water Science & Technology*, 61 (12), 3169-3176.