

EVALUACIÓN DE DIVERSOS MINERALES PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO

Verguinia Petkova Simeonova, Ma. de Lourdes Rivera Huerta, Martin Piña Soberanis, Martha Avilés Flores y Sara Pérez Castrejón

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor. CP 62550
Tel. (73) 19-42-99, Fax. (73) 19-43-81

RESUMEN

Con el propósito de identificar y definir un método económico y práctico para la remoción de arsénico presente en el agua de fuentes de abastecimiento para consumo humano se ha evaluado la capacidad de algunos minerales naturales o artificialmente acondicionados para remover arsénico (III) y (V). Se realizaron pruebas en lotes con 17 minerales entre ellos zeolita tipo clinoptilolita, carbón activado, arena y óxidos de hierro, manganeso y aluminio. Los minerales con los que se obtuvieron las mayores remociones fueron utilizados en pruebas en continuo. En esta última etapa se lograron remociones hasta del 100% con alúmina activada, 97% con hematita, 99% con arena recubierta con óxidos de hierro y 96% con zeolita recubierta con óxidos de manganeso. Actualmente se está trabajando con el fin de prolongar los ciclos de operación antes de la regeneración de los medios.

INTRODUCCIÓN

El arsénico es un elemento que a ciertas concentraciones ocasiona efectos adversos a la salud. Las principales rutas de exposición son la ingesta y la inhalación. Los efectos crónicos del arsénico son principalmente lesiones en la piel tales como hiperqueratosis de las manos y los pies, pigmentaciones simétricas y ulceraciones, además de otras afectaciones como conjuntivitis, miocarditis, problemas vasculares e irritación del aparato respiratorio^{1,2}.

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer lo ha clasificado como carcinógeno para los seres humanos. La OMS establece un límite de 0.01 mg/L³ en agua potable, la USEPA⁴ y la NOM 127-SSA1⁵ fijan como límite máximo permisible 0.05 mg/L de As

En México se ha detectado la presencia de arsénico en cuerpos subterráneos de agua que se utilizan para el abastecimiento de la población, por ejemplo en la comarca lagunera comprendida en los estados de Coahuila y Durango; en Zimapán, Hidalgo; en Acámbaro, Guanajuato; en Zacatecas, Zacatecas; en Huautla, Morelos y en Delicias-Meoqui y Camargo-Jiménez en Chihuahua, lugares donde se alcanzan concentraciones de arsénico hasta de 1.0 mg/L^{6,7,8}.

Especiación de arsénico en el agua

En las aguas naturales el arsénico se presenta en varios estados de oxidación como semi-metálico, As⁰, o en forma de iones como arsenato As⁺⁵, arsenito As⁺³ y arsina As⁻³. La toxicidad del arsénico se incrementa considerablemente con la reducción de su estado de oxidación de As(V) a As(III).

Técnicas para remoción de arsénico

Las tecnologías utilizadas actualmente para la remoción de arsénico son coagulación, adsorción sobre carbón activado o alúmina activada, intercambio iónico, electrodiálisis y ósmosis inversa⁹.

La coagulación de As(V) con sales de Al(III) y Fe(III) es un método reconocido como uno de los más eficientes para la remoción de arsénico. Las sales de hierro y aluminio se hidrolizan formando hidróxidos sobre los cuales el As(V) se adsorbe y coprecipita.

El proceso de oxidación-coagulación es aplicable para aguas superficiales con alta turbiedad, donde además de arsénico deben removerse otros contaminantes. En estos casos es justificable un tratamiento convencional que incluya: mezcla, floculación, sedimentación y filtración; donde la mayor parte de arsénico se remueve durante la sedimentación.

En fuentes subterráneas, donde el agua es de mejor calidad, el tratamiento convencional no es recomendable por la complejidad de la operación, la cantidad del coagulante, los volúmenes del lodo producido y el costo de la planta. En estos casos, por lo general, el intercambio iónico o la adsorción sobre alúmina activada resultan más factibles, no obstante que el costo de las resinas (200 USD/ft³) o de la alúmina activada (\$28 /Kg, precio de 1997) es alto.

Estos procesos son altamente costosos aún para el tratamiento de pequeñas cantidades de agua, por lo que se deben buscar alternativas factibles de aplicación en pequeños sistemas de abastecimiento.

OBJETIVO

Evaluar la remoción de arsénico presente en agua para consumo humano mediante adsorción sobre varios minerales, e identificar las condiciones que favorecen la fijación de los arsenatos o arsenitos sobre el mineral (sorbente).

METODOLOGÍA

Siguiendo los principios descritos anteriormente, se están buscando minerales apropiados para ser utilizados como sorbentes, y las condiciones más favorables de pH-pE que aseguren la remoción del arsénico por adsorción sobre los mismos. Un mineral apropiado es aquel que: a) tiene afinidad química al arsénico y a sus formas hidrolizadas en el agua natural (es decir puede formar complejos superficiales con el mismo), b) propicia interacciones electrostáticas con el arsénico.

Los mecanismos que rigen la remoción de un contaminante (soluto) por un sólido (sorbente) se determinan por las interacciones intermoleculares que existen en un sistema soluto-solvente-superficie.

La energía libre de adsorción es la suma de las energías de las interacciones químicas, electrostáticas y de solvatación o hidratación.

Los arsenatos coprecipitan o se adsorben sobre hidróxidos de hierro^{10,11,12} involucrando reacciones superficiales altamente específicas. La revisión bibliográfica muestra que la mejor adsorción de As(V) sobre Al(OH)₃ y Fe(OH)₃ tiene lugar entre un pH de 4 y 7, cuando la superficie del sorbente es de carga positiva y el arsénico está en forma aniónica. En este sistema se asegura tanto el contacto entre el contaminante y el sorbente, como la energía debida a las interacciones electrostáticas, las cuales juegan un papel muy importante para la sorción del arsénico sobre las sales de Al(III) y Fe(III) formadas durante la hidrólisis y también sobre sus hidróxidos.

En la naturaleza se ha observado que los óxidos de hierro tienen carga superficial positiva en la mayoría de los ambientes geológicos y adsorben preferentemente aniones, lo mismo sucede con el hidróxido de aluminio y las arcillas¹³.

Materiales y métodos

En base a lo mencionado anteriormente, los minerales utilizados fueron seleccionados principalmente por su contenido de óxidos de hierro, manganeso u otro metal y/o por su carga superficial (positiva) en condiciones de pH característico de aguas naturales. Los minerales utilizados fueron: sulfato de calcio, corindón, zeolita natural (clinoptilolita), zeolita cubierta con óxidos de manganeso, zeolita cubierta con óxidos de hierro, alúmina hidratada, alúmina calcinada, bauxita calcinada, bauxita natural, caolín FC, ferromanganeso, briqueta de manganeso, hematita, óxido de hierro rojo, carbón activado tratado con CuSO_4 y dióxido de manganeso.

El As(V) en el agua fue obtenido a partir de arsenato dibásico de sodio heptahidratado, $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, mientras que la solución de As(III) se preparó a partir de trióxido de arsénico, As_2O_3 , ambos reactivos de grado analítico.

Los parámetros monitoreados en las diversas pruebas fueron la concentración de As, la conductividad eléctrica (C.E.) y el pH. En algunos casos fue necesario analizar hierro, manganeso, cobre y cloro libre residual.

El pH de las muestras fue medido utilizando un potenciómetro Orión 420, la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales se determinaron con un conductímetro Hach.

Las concentraciones de Fe, Mn, Cu y cloro libre residual fueron medidas usando un espectrofotómetro Hach Drel 2000 con los siguientes métodos colorimétricos: 1-10 fenantrolina (ferrover), 1-(2-pirilidazo)-2-naftol (PAN), bicinchinonato y N, N-dietil-p-fenilendiamina (DPD) respectivamente.

La concentración de As en algunos casos fue determinada mediante espectroscopía de absorción atómica y en otros se utilizó un método semicuantitativo (Merckoquant) en el cual se añade zinc y HCl a la muestra para producir AsH_3 a partir de las formas de arsénico (III) y (V). Dicho compuesto reacciona con HgBr_2 formando halogenuros mixtos de arsénico y mercurio, que colorean una varilla indicadora. Los valores que pueden ser leídos con este método son 0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.7 y 3.0 mg/L.

Modelos experimentales

Para los estudios de adsorción de arsénico por lotes se usaron diferentes cantidades de mineral en forma granular o en polvo. Cada muestra se colocó en vasos de precipitado de 1L, con 400 mL de solución a una concentración aproximada de 1.0 mg/L de arsénico. Las muestras se sometieron a agitación entre 80 y 200 rpm, según el caso durante 17 horas. Después de evaluar la capacidad de los minerales para remover el As(III), y el As(V), se eligieron los que mostraron mejores resultados y se utilizaron para llevar a cabo pruebas en continuo.

Las pruebas en continuo se llevaron a cabo en columnas de acrílico de 9 cm de diámetro empacadas con el mineral de estudio, colocado sobre una capa de soporte que sirve también para la distribución uniforme del flujo. La solución de arsénico fue alimentada a las columnas con una bomba peristáltica. Las soluciones de HCl o NaOH utilizados para el ajuste del pH fueron aplicados con otra bomba peristáltica en el influente de la columna o directamente en el tanque de alimentación de la solución de arsénico, según el caso. Las columnas están provistas con válvulas para controlar el flujo a través del lecho y así ajustar el tiempo deseado de contacto entre el arsénico y el material de empaque.

RESULTADOS

Pruebas por lotes con diversos minerales.

Remoción de As (III)

En esta etapa se probaron 5 diferentes tipos de minerales: sulfato de calcio, alúmina hidratada, corindón, zeolita natural y zeolita recubierta con óxidos de manganeso. Las cantidades de los minerales equivalen a 0.4, 1.0, 2.0, 4.0 y 6.0 g/L de cada uno.

Los mejores resultados se obtuvieron con alúmina hidratada con tamaño de partícula de 0.044 mm (malla 300), la cual fue pre-acidificada con HCl al 2% para protonar la superficie y promover la remoción de los aniones de arsénico. En este caso se obtuvo una remoción del 47% de As(III).

Remoción de As (V)

Para la remoción de As(V) se probaron seis materiales: zeolita, alúmina calcinada, bauxita, ferromanganeso, briquetas de manganeso y carbón activado con sulfato de cobre. Se realizaron 13 pruebas, incluyendo a la zeolita activada con CuSO_4 o tratada con soluciones de FeSO_4 y KMnO_4 ; zeolita tratada con soluciones de FeSO_4 y NaOCl y zeolita tratada con soluciones de MnSO_4 y KMnO_4 , con la finalidad de obtener una capa de óxidos de Fe, Mn o de ambos.

Se utilizó una cantidad equivalente a 1.0 y 6.0 g/L de los minerales, se ajustó el pH entre 6.0 y 7.0 con NaOH y se siguió el procedimiento antes descrito.

En las pruebas con zeolita y carbón activado cubiertos con óxidos de cobre se mantuvo el pH de la solución entre 6 y 7 con objeto de trabajar por abajo del punto de carga cero del CuO ($\text{pH}_{\text{pzc}} = 9.5$), propiciando que la carga superficial del mismo fuera positiva y promoviendo así la adsorción.

En la figura 4 se muestra en forma resumida la remoción de As(V) para los minerales evaluados.

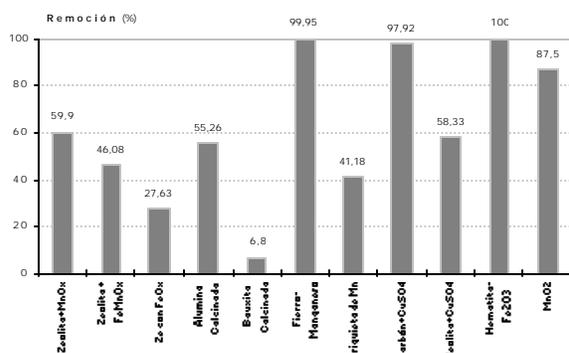


Figura 4. Remoción de As(V) con diversos minerales (6 g de material/L en una solución de 1 mg As/L)

Es notable la remoción de arsénico por los minerales naturales con alto contenido de óxidos de hierro y manganeso como son: el ferromanganeso, la hematita, el dióxido de manganeso y el carbón activado con sulfato de cobre. Estos minerales son buenos adsorbentes de As(V) sobresaliendo los 2 primeros. Por lo general, la remoción de As(V) mediante adsorción sobre los minerales estudiados es más eficiente que con las especies de As(III).

Adsorción de As (V) en continuo

Las pruebas de remoción de As (V) en línea se efectuaron utilizando dos de los materiales con los que se obtuvieron los mejores resultados en la prueba anterior: la hematita y el carbón activado tratado con sulfato de cobre.

Remoción de As (V) en lecho de carbón activado

Se preparó una solución de arsénico cuyas características fueron: pH=7.17, Cu = 0.08 mg/L y As = 1-1.7 mg/l.

El espesor del lecho en la columna fue de 20 cm y el flujo, Q = 150 mL/min. con un tiempo de contacto (Tc) de 8.5 min y una tasa de operación de 1.47 m³/m²h. Durante la operación se monitorearon en el efluente los siguientes parámetros: arsénico, cobre y pH. La determinación de As en este caso se hizo con Merckoquant. La figura 5 muestra la concentración de arsénico y cobre en el efluente de la columna.

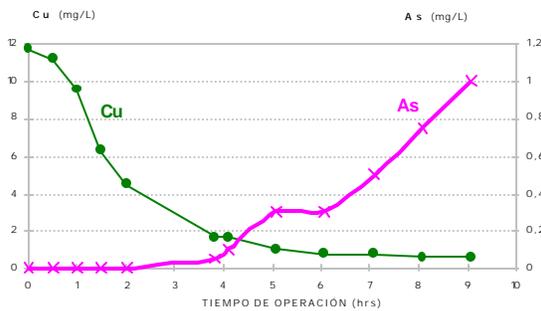


Figura 5. Remoción de As(V) a través de carbón activado-CuO (concentración de As en el influente entre 1-1.7 mg/L)

A medida que disminuye el Cu en el efluente, decrece la remoción de arsénico y aumenta el pH en el efluente. La “fuga” del arsénico, corresponde al punto en donde la concentración de Cu en el efluente es constante. Por otra parte, la concentración de As en el efluente aumenta bruscamente hasta alcanzar la concentración inicial cuando está desorbido todo el cobre del lecho.

Remoción de As(V) en lecho de hematita.

Las características de la solución de arsénico utilizada en esta prueba fueron: As = 1.7-3.0 mg/L, Fe = 0.04 mg/L y pH = 6.90. El espesor del lecho en la columna fue de 15 cm y el flujo de operación de 100 mL/min, con un tiempo de contacto (Tc) de 9.5 minutos.

Se ajustó el pH del influente de tal forma que el pH del efluente fuera de 7, ya que el mineral incrementa el pH del agua al entrar en contacto con el mismo (figura 6).

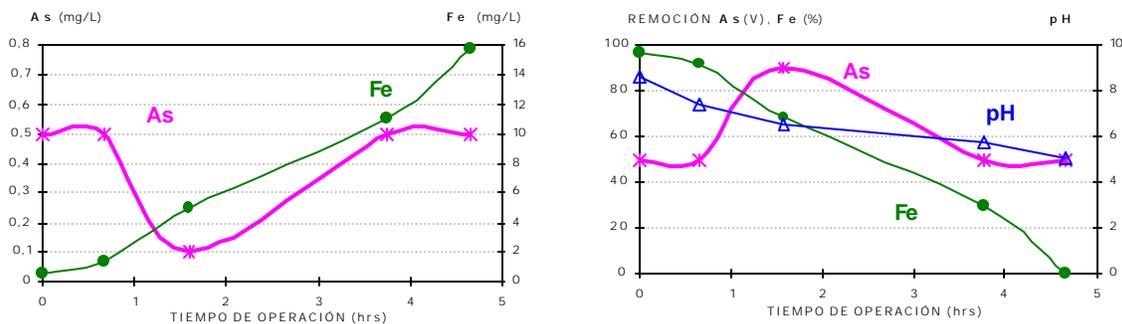


Figura 6. Remoción de As (V) en lecho de hematita (Concentración inicial de As entre 1.7 - 3.0 mg/L)

Como consecuencia de la acidificación del agua a tratar, se provocó la disolución del hierro contenido en la hematita presentando altas concentraciones del mismo en el efluente. A medida que disminuye el pH se incrementa la solubilidad de hierro y por lo tanto su concentración en el efluente.

La concentración de As en el efluente aumentó simultáneamente con la disolución del hierro, lo que indica que el As está adsorbido al hierro. Es importante controlar la solubilidad del hierro por medio del pH.

Adsorción de As (V) en continuo (segunda etapa)

En base a las pruebas anteriores se definió que el pH y las condiciones de óxido-reducción son factores primordiales en el control del proceso para la remoción de As. Debido a esto se realizaron otras pruebas en continuo para encontrar las condiciones adecuadas de operación.

Se utilizó el mismo modelo experimental de las pruebas mencionadas anteriormente usando un espesor de lecho de 0.4 m. Los minerales evaluados fueron: hematita, zeolita (clinoptilolita) cubierta con óxidos de manganeso, arena cubierta con óxidos de hierro y alúmina activada, esta última se evaluó con fines comparativos.

Zeolita cubierta con óxidos de manganeso

Esta serie de pruebas se realizó con el fin de evaluar el efecto de la presencia de especies de Fe(III) en la remoción de arsénico (III) y (V) cuando el medio de contacto contiene óxidos de manganeso. En el influente de la columna se añadió una solución de FeCl_3 , variando las dosis aplicadas de 0.5 a 10 mg/l. En otras pruebas se aplicó 1.5 mg Fe/L a partir de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 1.5 mg Mn/L a partir de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Las características de la zeolita utilizada son: $d_{cq} = 1.59$, $\epsilon = 50.5\%$, $\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$. El flujo se fijó en 500 mL/min, equivalente a un T_c de 5 min y una tasa de $5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Con el arsénico(III) se trabajó durante 1.5 horas a una tasa de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ y posteriormente se redujo a $5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Durante estas pruebas se monitoreó As, Fe, Mn, Cl, pH y C.E. en la entrada y salida del filtro y en algunos casos se monitoreó cloro libre, Cl_2 , así como las pérdidas de carga hidráulica. Los resultados muestran que cuando se aplica una mayor dosis de Fe(III) se mejora la remoción del As(V), teniendo que aumentarse hasta 10 mg/L o más para obtener una concentración de As residual abajo del límite máximo permisible por la NOM-127-SSA. En estas pruebas se alcanzó hasta 90% de remoción de As cuando se utilizaron las dosis mayores de FeCl_3 en el influente.

En la figura 7 se nota una relación directa entre la concentración de Fe y As en la salida, es decir, a medida que aumenta el Fe en el efluente también aumenta la concentración de As en el mismo. Lo anterior demuestra la formación de un compuesto Fe-As en el lecho del filtro. La disolución del complejo As-Fe formado sobre el óxido de manganeso causa el aumento de la concentración de Fe y por ende de As en la salida de la columna.

Las pérdidas de carga, (figura 8), aumentan a medida que avanza el proceso, posiblemente debido a la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Las pruebas anteriores demuestran que la remoción de As(V) durante la oxidación de hierro es controlada por los hidróxidos férricos formados en dicho proceso.

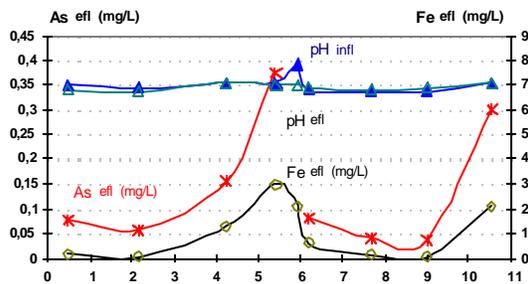


Figura 7. Remoción de As(V) a través de zeolita recubierta con MnOx y adición de Fe (III).

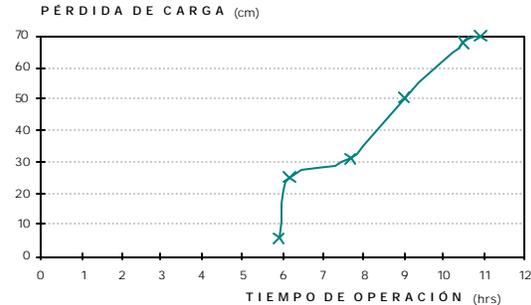


Figura 8. Pérdidas de carga hidráulica

Hematita

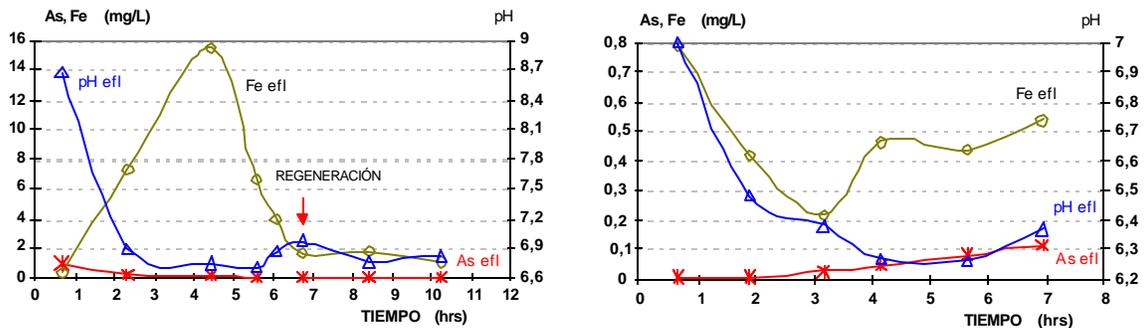
Las pruebas se realizaron con As(V) a un $Q = 50 \text{ mL/min}$ ($T_c = 25 \text{ min}$). Las características del material usado fueron: diámetro entre 0.86 y 1.0 mm, $\epsilon = 53\%$, $\rho = 3.89 \text{ g/cm}^3$. Al igual que en las pruebas anteriores, la concentración de As(V) en el influente de la columna fue de 1.0 mg/L.

Con el fin de no solubilizar el hierro, componente principal de la hematita en la primera prueba el pH se ajustó entre 6 y 8 en el efluente de la columna agregando HCl al influente de la misma.

Durante la operación se monitorearon en la salida de la columna: pH, C.E y las concentraciones de As y Fe, Una vez alcanzado el límite de la NOM-127 de 0.05 mg/l de As, se suspendió la operación de la columna y se regeneró el lecho de acuerdo al siguiente procedimiento:

1) Se lavó el lecho con una solución de NaOH al 4% utilizando una cantidad igual a 5 volúmenes de lecho (VL), 2) Se lavó con agua limpia utilizando el equivalente a 11 VL, 3) Se activó el lecho con una solución de 50 mg/L de Fe(III), a partir de FeCl_3 , a pH de 8 durante 10 minutos, 4) Se acidificó con una solución de HCl 0.05N con un VL, 5) Se lavó el lecho con agua limpia con dos VL. En todos los casos las soluciones se pasaron a través de la columna de forma que las mismas tuvieran 15 minutos de contacto con el material en el lecho.

En la segunda prueba se ajustó el pH entre 4.5 y 5.0 directamente en el recipiente de alimentación y se inició la operación de la columna una vez que el pH y la C.E. se estabilizaron. En el influente de la columna se añadió NaOH para controlar el pH del efluente entre 6.0 y 8.0 y de esta forma lograr una mayor afinidad del medio con los arsenatos. En esta prueba se logró obtener un 90% de remoción de As(V) a bajas tasas de operación ($0.5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$)



a) b)
Figura 9. Evolución de arsénico en lecho de hematita con ajuste de pH a) en el influente de la columna, b) en el tanque de alimentación

En la figura 9 se muestra la remoción del As en el lecho de hematita con respecto al tiempo de operación de la columna y se puede observar el agotamiento progresivo del sorbente. Con las condiciones de operación antes mencionadas, el proceso remueve As por debajo de la norma durante 5 horas de operación. Después de la regeneración, en el primer caso, figura 9(a), la concentración de As(V) se reduce hasta 0.0088 mg/l.

Arena recubierta con óxidos de hierro

En estas pruebas se empacó la columna con 0.34 m de material con diámetro entre 1.7 y 2.0 mm. Se alimentó una solución de As(V) a un flujo de 100 mL/min, equivalente a una tasa de operación de $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ y con un tiempo de retención de 21.6 min. Durante la operación de la columna se monitoreó el As, Fe, pH y C.E. en la entrada y salida del filtro y la columna operó durante 7 horas con un efluente de As(V) < 0.05 mg/L. La figura 10 muestra la evolución de As(V), Fe(III) y pH en la salida de la columna.

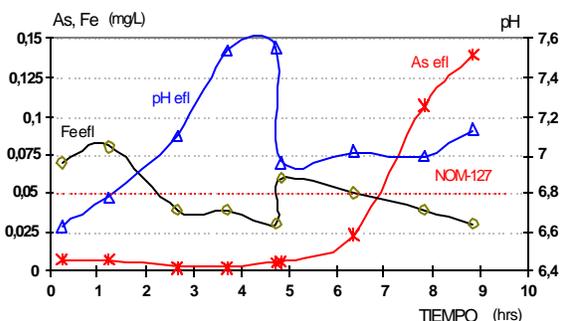


Figura 10. Evolución de As(V), Fe(III) y pH en efluente de la columna de arena recubierta con óxidos de hierro

En este proceso no se requiere ajustar el pH y el efluente no es afectado por la desorción excesiva del hierro. El problema principal radica en la técnica de activación de la arena con los óxidos de hierro. El material, lavado y acidificado a pH=1 durante 24 horas, se secó a 105° C. La cubierta fue aplicada por evaporación de una solución de nitrato férrico, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$, a temperatura de 110 °C durante 20 horas, obteniéndose una concentración de 6.89 mg de Fe por gramo de arena.

Alúmina activada

La columna se empacó con 0.4 m de alúmina cuyas características son: $d_q=0.93 \text{ mm}$, $\epsilon=70.3\%$ y $\rho=2.23 \text{ g/cm}^3$.

La solución de As(V) a una concentración de 0.9 mg/l se alimentó a la columna con un $Q = 500 \text{ mL/min}$, equivalente a un tiempo de contacto de 5 minutos y una tasa de operación de $4.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. El pH fue controlado entre 5 y 6 con HCl en el recipiente de alimentación.

Durante la operación de la columna se monitoreó la concentración de As, pH y C.E. en la entrada y salida del filtro. La columna operó durante 32 horas tratando un volumen total de 800 litros y removiendo el 100% del As introducido.

La alúmina se regenera de la siguiente manera: a) Se trata con una solución de NaOH al 4% usando un total de 5 VL, b) Se lava con agua limpia con un mínimo de 11 VL, c) Se lava con una solución de HCl 0.05 N con un total de 1 VL, por último, d) Se lava con agua limpia con un mínimo de 2 VL. El Tc de las soluciones para la regeneración del lecho deberá ser de 15 minutos.

CONCLUSIONES

Las especies de As (III) se remueven más fácilmente, mediante adsorción, que las especies de As(V). Por lo anterior es necesario una preoxidación antes de la aplicación de cualquier tratamiento para mejorar la eficiencia del mismo.

Es sobresaliente la capacidad de los minerales con alto contenido de óxidos de hierro y manganeso (hematita, ferromanganeso y dióxido de manganeso) para remover arsenatos.

La presencia de Fe(III) en el agua a tratar fomenta la formación de complejos de Fe-As que pueden ser adsorbidas en la superficie de minerales que contienen óxidos de manganeso.

La hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) resulta un buen adsorbedor de arsénico teniendo como inconveniencias a) requerir un control estricto del pH para no solubilizar el mineral e incrementar la asociación de As (V) con el hierro y b) necesitar un tiempo alto de contacto en el lecho (aproximadamente 25 minutos).

Los resultados obtenidos usando arena recubierta con óxidos de hierro son notables si se considera que no se requiere el ajuste de pH y no existe desorción significativa de hierro, sin embargo su principal desventaja radica en la complejidad del procedimiento de acondicionamiento del medio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pontius, F.W., Brown, K.G. y Chein, C. J. (1994). *Health Implications of Arsenic in Drinking Water*. Jour. AWWA, 86:9:52
2. Galvao, L.A.C. y Corey, G. *Arsénico*, Serie Vigilancia 3. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Metepec, México.
3. *Guías para la calidad del agua potable* Vol. 1 (1995) 2a. ed. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, pp 37-43.
4. *National Interim Primary Drinking Water Regulation* (1976) USEPA. Water Supply. EPA-570/9-76-003.
5. *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 Mexicano 18-01-1996.
6. Armienta, M., Rodríguez, R., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A., Villaseñor, G., Hernández, E. (1996) *Problemática ambiental del arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo*. Actas INAGEQ, 2, pp 313-316. Instituto Nacional de Geoquímica, A.C., México.
7. García E., A., Armienta H., M. (1996) *Distribución de arsénico en sedimentos fluviales a lo largo del río Tolimán, Zimapán, Hgo., México*. Instituto Nacional de Geoquímica, Actas INAGEQ, 2, pp 327-329.
8. Cortés Bejar, F., Sosa Estrada, A., García, L. (1986) *Solución al problema de arsénico en la comarca lagunera por ósmosis inversa*. Panorama.
9. Cheng, R., Liang, S., Wang, H., Beuhler, M. (1994) *Enhanced coagulation for arsenic removal*. Journal AWWA. Sep. pp 79-90.
10. Shindler, P. (1981) "Surface complexes at oxide-water interfaces", en Andersn y A. J. Rubin (editores). *Adsorption of inorganics at solids- liquid interfaces*, Ann Arbor, Mich.
11. Edwards, M. (1994) *Chemistry of arsenic removal during coagulation y Fe-Mn oxidation*. Journal AWWA. Sep. pg 64-78.
12. Hering, P., Chen, P., Wilkie, J., Elimelech, M., Liang, S. (1996) *Arsenic removal by ferric chloride*, Journal AWWA. April pp 155-167.
13. Ferguson, J. and Gavis, J. (1972) *A review of the arsenic cycle in natural waters*. Water Research Pergamon Press, Vol. 6, pp.1259-1274.