

## Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, Estado de Hidalgo, México\*

F. Pérez-Moreno\*\*, F. Prieto-García\*\*\*, A. Rojas-Hernández\*\*\*\*, Y. Marmolejo-Santillán\*\*\*, E. Salinas-Rodríguez\*\* y F. Patiño-Cardona\*\*

### Resumen

Se investigaron resinas de intercambio aniónico con respecto a su capacidad para la eliminación de arsénico contenido en agua. Se utilizó agua del pozo V de Zimapán, Hidalgo, México, cuya concentración promedio es de  $480 \pm 11 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  de arsénico y es utilizada para consumo humano. Se emplearon dos resinas aniónicas fuertes; una, de tipo macro reticular (IRA-900) y la otra de tipo gel (IRA-400), así como una tercera, aniónica débil, de tipo macro reticular (IRA-96). Los experimentos realizados con estas resinas muestran que la IRA-900 es la que mostró la más alta eficiencia en la eliminación de arsénico del agua potable, debido a que presentó una capacidad de tratamiento de  $700 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ , mientras que las capacidades de las resinas IRA-400 e IRA-96 fueron de 320 y  $52 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ , respectivamente. La concentración promedio de arsénico remanente en el agua tratada fue de  $24 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  y está dentro del límite máximo permisible por la norma oficial mexicana para agua potable.

### Palabras clave

Agua potable. Arsénico. Eliminación. Resinas de intercambio.

## Study of arsenic removal with ionic exchange resins in drinking water from Zimapán, Hidalgo State, Mexico

### Abstract

Anionic exchange resins were research with respect its capacity for removal arsenic content in water. Water of well V from Zimapán Hidalgo Mexico was used to make this research, because this water have a mean concentration of  $480 \pm 11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  of arsenic and it is available as drinking water. The exchange resins employed were two strong anionic, one macroreticular (IRA-900) and other gel type (IRA-400), as soon as one third anionic weak macroreticular type (IRA-96). The experiments carried with this resins showing that IRA-900 has highest efficient in the process of arsenic removal from drinking water, because, it showed a treatment capacity of  $700 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ ; while that capacities of IRA-400 e IRA-96 resins were 320 and  $52 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$  respectively. The mean concentration of arsenic residue in the treatise water was  $24 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  and it is within the maximum level permissible by Mexican official norm for drinking water.

### Keywords

Drinking water. Arsenic. Renoval. Exchange resins.

\* Trabajo presentado el día 8 de diciembre de 2004 y aceptado en su forma final, el día 18 de enero de 2006.

\*\* Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carr. Pachuca-Tulancingo, Km 4.5 Pachuca, C.P. 42076. Hidalgo, México.

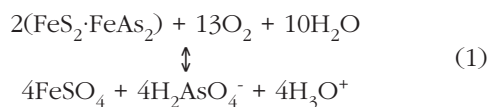
\*\*\* Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carr. Pachuca-Tulancingo, Km 4.5 Pachuca, C.P. 42076. Hidalgo, México.

\*\*\*\* Departamento de Química Analítica. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186. Col. Vicentina, México, D. F., C.P. 09340, México.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea de Zimapán presenta, sobre todo en los pozos profundos<sup>[1-3]</sup>, contenidos altos de arsénico que rebasan los límites máximos permisibles de la norma oficial mexicana actual, de 25  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ <sup>[4]</sup>, debido a que es una región donde se explotan los minerales PbS, CuS, Ag<sub>2</sub>S y ZnS y que, además, se encuentran asociados a minerales arsenicales como la arsenopirita (FeS<sub>2</sub>·FeAs<sub>2</sub>), el rejalgar (AsS) y oropimente (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), entre otros; estos últimos, exhiben solubilidades apreciables en solución acuosa, que dependen del pH, del ambiente iónico y de las condiciones existentes en el suelo y subsuelo como acidez, temperatura, ambientes oxidantes y/o reductores<sup>[5]</sup>.

La transformación de los minerales arsenopiríticos se debe, principalmente, a las condiciones oxidantes del medio ambiente que les rodea, en respuesta natural a los cambios ambientales originados por la explotación de los minerales, así como al sistema de bombeo en la extracción del agua subterránea y a la presencia de aire y agua con oxígeno disuelto que penetra al subsuelo. El equilibrio 1, es un ejemplo de la oxidación de estos minerales que hace, también, que se incremente la concentración de As(V) en sus diferentes especies en el agua, además de incrementarse las concentraciones de los iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Fe<sup>2+</sup> y H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. En consecuencia, también habrá una disminución del pH en el agua.



El arsénico que se presenta en el agua está, principalmente, como As(V), en las formas de H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup> y HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, cuyas especies son menos tóxicas que las correspondientes al As(III) y, además, han sido estudiadas anteriormente por otros investigadores<sup>[1, 3 y 6-9]</sup>.

El presente trabajo se propone como objetivo comparar la eficiencia de eliminación de arsénico contenido en el agua subterránea extraída del pozo V de Zimapán, Hidalgo, la cual es utilizada como agua potable por la población de la localidad. Se utilizaron tres tipos de resinas de intercambio aniónico, dos aniónicas fuertes (IRA-900, IRA-400) y una aniónica débil (IRA-96).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Agua tratada

El agua del pozo V de Zimapán, Hidalgo, se utilizó para realizar el presente estudio y presentó una con-

centración promedio de arsénico total de 480 ± 11  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ .

#### 2.1.2. Intercambiadores iónicos utilizados

Se utilizaron dos resinas aniónicas básicas fuertes, una de tipo macro reticular (IRA-900) con grupo funcional NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de la marca Sigma, con un tamaño de partícula que varía de 300-991  $\mu\text{m}$  y, la otra, de tipo gel (IRA-400) con matriz de estireno divinilbenzeno con el mismo grupo funcional y de la marca Fluka, con un rango en el tamaño de partícula comprendido entre 400 y 500  $\mu\text{m}$ . Se usó una tercera resina aniónica, débilmente básica, de tipo macroreticular (IRA-96) con matriz activa de poliamina de la marca Fluka con tamaño de partícula comprendido entre 300 y 833  $\mu\text{m}$ .

#### 2.1.3. Reactivos y soluciones utilizados

Solución estándar de arsénico 1.000,4  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de la marca Solutions Plus, Inc.; borohidruro de sodio (NaBH<sub>4</sub>) al 0,5%, estabilizado con NaOH al 0,05% como agente reductor y HCl 6 M.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Pre-tratamiento de los Intercambiadores iónicos

Las resinas fueron rehidratadas en un vaso de precipitados con agua destilada y, posteriormente, se activaron con solución de NaCl al 4%. Ambos procesos se realizaron con agitación continua durante 20 min y, seguidamente, se lavaron con agua desionizada, repitiéndose tres veces estas operaciones antes de realizar el proceso de intercambio.

### 2.2.2. Condiciones de operación en el acondicionamiento de las resinas

Una vez activadas las resinas, se colocaron 25 ml de cada una de ellas en una bureta de 50 ml que actuaba como columna cromatográfica; se les hizo pasar 100 ml de solución de NaCl al 4%, dejando drenar la columna a un flujo de 2-3  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ , quedando, de esta forma, perfectamente activadas y listas para ser utilizadas.

### 2.2.3. Condiciones de operación en la eliminación de arsénico

A las resinas activadas se les hizo pasar agua del pozo V de Zimapán, a un flujo de 2-3  $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ , a temperatura ambiente.

#### 2.2.4. Colección de fracciones

Se recogieron fracciones de 50 ml ( $2 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ ) de agua, desechando la fracción impar y analizando la par en forma consecutiva, es decir, cada fracción analizada equivale a 100 mL de agua del pozo V tratada ( $4 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ ).

#### 2.2.5. Regeneración de resinas de intercambio iónico

Cuando las resinas IRA-900 e IRA-400 agotaron su capacidad de retención de arsénico (eficiencia menor a 85%), fueron lavadas con agua normal a contraflujo y con aire, parando el flujo de agua cuando la resina se expandió al doble, y se dejó lavando 20 min únicamente con aire; posteriormente, se detuvo el flujo de aire y se le hizo pasar agua lentamente, desechando el material residual por la parte superior de la columna. Esta operación se realizó dos veces, se dejó sedimentar la resina y, por la parte superior, se le hizo pasar 100 ml de solución de NaCl al 4%, a un flujo de 2-3 ml·min<sup>-1</sup>. De esta forma, la resina quedó completamente regenerada y lista para ser reutilizada.

#### 2.2.6. Determinación de la concentración de arsénico

La determinación del arsénico en las fracciones del agua tratada se realizó con la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros, para lo cual se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica marca Varian, modelo Spectr AA 880, con lámpara de cátodo hueco del mismo elemento a una intensidad de corriente de 10 mA y longitud de onda de 193,7 nm, con llama de aire-acetileno optimizada y utilizando N<sub>2</sub> de alta pureza como gas acarreador, previa prereducción de la muestra con solución de KI y ácido ascórbico al 5% en medio clorhídrico<sup>[10]</sup>, para asegurar la reducción total del As(V) a As(III).

#### 2.2.7. Condiciones de análisis

La muestra prereducida, el borohidruro y el ácido clorhídrico fueron introducidos en línea a flujo continuo; para la muestra se utilizó un flujo de 8,0 ml·min<sup>-1</sup>, mientras que para las soluciones de borohidruro y ácido clorhídrico el flujo que se empleó fue de 1,0 ml·min<sup>-1</sup>.

#### 2.2.8. Determinación de la concentración del arsénico

La concentración de arsénico en las muestras analizadas se determinó utilizando la fórmula:

$$C_r = \frac{(C_i \times V_{af} \times F_d)}{V_m} \quad (2)$$

donde,  $C_r$  es la concentración real de arsénico en la fracción analizada en  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ .

$C_i$  es la concentración de arsénico leída por el equipo previamente calibrado en  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ .

$V_{af}$  es el volumen en el que se aforó inicialmente la muestra, en ml.

$F_d$  es el factor de dilución de la muestra leída en el equipo (valor adimensional).

$V_m$  es el volumen de muestra que se tomó para el análisis, en ml.

#### 2.2.9. Determinación de arsénico retenido en el proceso de intercambio

El arsénico retenido por las resinas utilizadas en el proceso de eliminación de arsénico del agua potable se determinó utilizando la fórmula:

$$\% R = \frac{(C_{mi} - C_{fe})}{V_m} \times 100 \quad (3)$$

donde,  $\% R$  es el porcentaje de retención de As por las resinas en cada fracción de agua colectada después del intercambio.

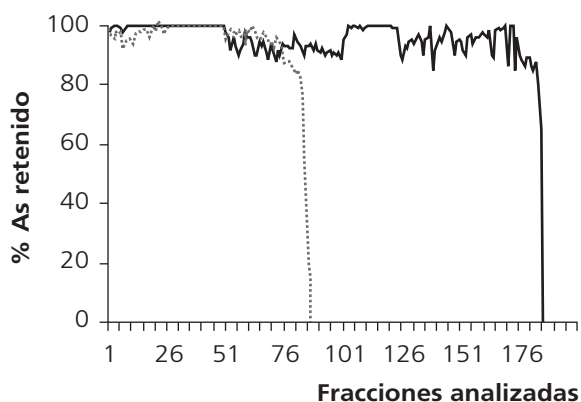
$C_{fe}$  es la concentración de arsénico en la fracción eluida, en  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$

$C_{mi}$  es la concentración de As en la muestra inicial en  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$

Cuando el  $\%R$  disminuye paulatinamente a valores menores de 80%, se considera un agotamiento de la capacidad de retención de la resina, por lo que se detendrá el proceso de eliminación de arsénico y se iniciará el lavado y la regeneración del material intercambiador hasta dejarla lista para realizar un nuevo proceso de intercambio.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La eficiencia de las resinas en el proceso de eliminación de arsénico contenido en agua del pozo V de Zimapan, Hidalgo, fue variable. Sin embargo, la resina macro reticular aniónica fuerte IRA-900 presentó la más alta eficiencia de tratamiento en este proceso. Con esta resina se trataron  $700 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$  es decir



**Figura 1.** Porcentaje de arsénico retenido en las resinas aniónicas fuertes: IRA-900 macro reticular \_\_\_\_\_ e IRA-400 de tipo gel \_\_\_\_\_. Una fracción corresponde a 100 ml de agua tratada.

Figure 1. Arsenic percentage fixed in strong anionic resins IRA-900 macroreticular \_\_\_\_\_ and IRA-400 gel type \_\_\_\_\_. Each fraction is 100 mL of treated water.

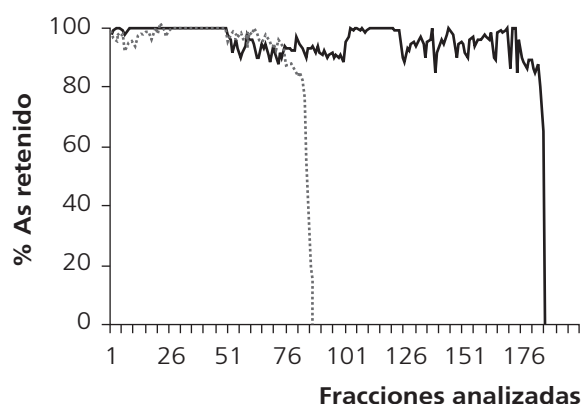
25 ml de resina lograron tratar 17,5 l de agua, logrando disminuir la concentración promedio de arsénico en el agua desde  $480 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  hasta  $24 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ , antes de que se pueda observar la disminución en su capacidad de retención de arsénico, como se muestra en la figura 1.

Por otra parte, la resina aniónica fuerte de tipo gel IRA-400 presentó una capacidad de tratamiento de  $320 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ , logrando tratar 8,0 l de agua con las mismas condiciones de operación, por lo que esta resina presenta, aproximadamente, el 50% de eficiencia con respecto a la resina IRA-900.

Por su parte, la resina macro reticular aniónica débil IRA-96 presentó una capacidad de tratamiento de  $52 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ , que corresponde a 1,3 l de agua tratada, esta capacidad de retención es la más baja de las tres resinas utilizadas para este estudio, como se muestra en la figura 2.

El proceso de eliminación de arsénico se repitió con las resinas IRA-900 e IRA-400, después de que éstas se regeneraron, obteniendo resultados similares que confirman las capacidades de estas resinas para eliminar arsénico de agua potable, lo cual se muestra en la figura 3.

La capacidad teórica de intercambio aniónico para la resina IRA-900, según el fabricante es de  $1,0 \text{ meq}\cdot\text{ml}^{-1}$  [11]; sin embargo, su capacidad real de retención de arsénico, calculada en forma de  $\text{HAsO}_4^{2-}$  fue de  $0,6 \text{ meq}\cdot\text{ml}^{-1}$  de resina, como consecuencia de la competencia que tienen los iones arseniatos con otros iones como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el proceso de intercambio [12], lo que hace que la capacidad de ésta disminuya.



**Figura 2.** Porcentaje de arsénico retenido por la resina aniónica débil IRA-96 macro reticular \_\_\_\_\_. Una fracción corresponde a 100 mL de agua tratada.

Figure 2. Arsenic percentage fixed in weak anionic resin IRA-96 gel type \_\_\_\_\_. Each fraction is 100 mL of treated water.

#### 4. CONCLUSIONES

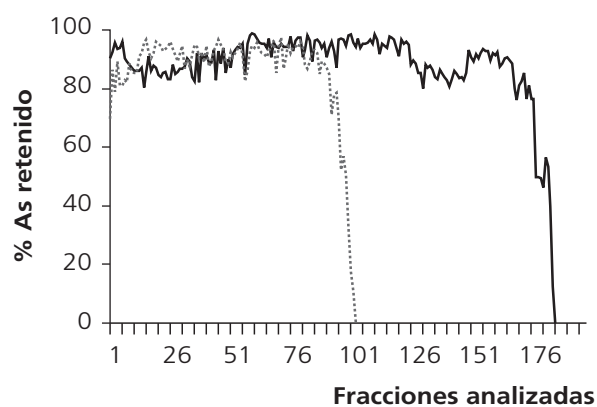
De las resinas aniónicas que se ensayaron, la que presentó mayor capacidad de retención de arsénico fue la IRA-900, ya que un volumen de 25 ml de resina IRA-900 logró el tratamiento de 17,0 l ( $700 V_{\text{agua}} \cdot V_{\text{res}}^{-1}$ ) de agua con un flujo de  $2\text{-}3 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ , a temperatura ambiente.

A pesar de que la capacidad real de eliminación de arsénico con la resina IRA-900 es menor que la reflejada en la literatura, puede utilizarse para realizar estudios a nivel de planta piloto y/o aplicarla directamente a una planta purificadora para la eliminación de arsénico.

Los tres tipos de resina aniónica utilizados logran reducir los niveles de arsénico(V) contenidos en el agua de Zimapán de  $480 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  antes del tratamiento, a valores menores de  $25 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  después del tratamiento, con eficiencias diferentes para cada resina.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades municipales de Zimapán, Hidalgo, México, el apoyo otorgado en el muestreo del agua de esta localidad, el apoyo económico otorgado por SIZA-CONACYT, que financió el proyecto cuya clave es SIZA-CONACYT/98/ 19980806018 y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo donde se realizó el trabajo experimental.



**Figura 3.** Porcentaje de arsénico retenido en las resinas aniónicas fuertes regeneradas: IRA-900 macro reticular \_\_\_\_\_ e IRA-400 de tipo gel \_\_\_\_\_. Una fracción corresponde a 100 ml de agua tratada.

Figure 3. Arsenic percentage fixed in regenerated strong anionic resins IRA-900 macroreticular \_\_\_\_\_ e IRA-400 gel type \_\_\_\_\_. Each fraction is 100 ml of treated water.

## REFERENCIAS

- [1] M.A. ARMIENTA, R. RODRÍGUEZ, A. AGUAYO, N. CENICEROS, G. VILLASEÑOR Y O. CRUZ, *Hydrogeology J.* 5 (1997) 39-46.
- [2] F. PÉREZ, F. PRIETO, A. ROJAS, C. A. GALÁN, Y. MARMOLEJO, C. ROMO, A. CASTAÑEDA, J. A. RODRÍGUEZ Y E. E. BARRADO, *Hidrobiológica* 13 (2003) 95-102.
- [3] F. PÉREZ, Tesis Doctoral, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, 2004.
- [4] C. JUSTO (Ed). *Diario Oficial de la Federación*, México. 166(15), 2000, pp. 73-79
- [5] R. F. MARTÍN, Tesis de Maestría, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000
- [6] M. P. ELIZALDE-GONZÁLEZ, J. MATTUSCH Y R. WENNRICH. *J. Environ. Monit.* 3 (2001) 22-26.
- [7] T. R. HARPER Y N. W. KINHAM, *Water Environ. Res.* 64 (1992) 200-203.
- [8] M. J. HEMMINGS, Y E. A. JONES, *Talanta* 38 (1991) 151-155.
- [9] A. S. WASAY, J. HARON, A. UCHIUMI Y S. TOKUNAGA, *Water Res.* 30 (1996) 1.143-1.148.
- [10] L. DAVIDOWSKI, *Perkin Elmer* 67 (1993) 1-7.
- [11] ROHM Y HASS (Ed). *Technical bulletin of Rohm and Hass Company*, EUA. IE-10066/81 (1982), pp. 2.
- [12] F. G. A. VAGLIASINDI Y M. M. BENJAMÍN, *Wat. Sci. Technol.* 38 (1998) 327-343.