

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México.
<i>Autor / Adscripción</i>	Miguel Ángel Mejía González Luis González Hita Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  Roberto Briones Gallardo Antonio Cardona Benavides Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  Pedro Soto Navarro Comisión Nacional del Agua, México
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 5(1): 71-82
<i>Fecha de publicación</i>	2014
<i>Resumen</i>	A fin de dilucidar los procesos que dan origen a las altas concentraciones de arsénico en el acuífero de la Comarca Lagunera (México), se llevaron a cabo estudios geoquímicos del agua subterránea y los sedimentos. Los resultados de la geoquímica de los sedimentos indican que el arsénico disponible se encuentra principalmente adsorbido en los óxidos de Fe amorfos y cristalinos. Los resultados de la geoquímica del agua subterránea indican: 1) intercambio catiónico entre el calcio y el sodio; 2) disolución de calcita debido al intercambio catiónico; 3) aumento del pH debido a la disolución de la calcita, y 4) altas concentraciones de arsénico debido a elevados valores de pH.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1320">http://hdl.handle.net/123456789/1320</a>

# MECANISMOS QUE LIBERAN ARSÉNICO AL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA COMARCA LAGUNERA, ESTADOS DE COAHUILA Y DURANGO, MÉXICO

• Miguel Ángel Mejía-González\* • Luis González-Hita •  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

\*Autor de correspondencia

• Roberto Briones-Gallardo • Antonio Cardona-Benavides •  
*Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México*

• Pedro Soto-Navarro •  
*Comisión Nacional del Agua, México*

## Resumen

MEJÍA-GONZÁLEZ, M.A., GONZÁLEZ-HITA, L., BRIONES-GALLARDO, R., CARDONA-BENAVIDES, A. & SOTO-NAVARRO, P. Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 1, enero-enero de 2014, pp. 71-82.

A fin de dilucidar los procesos que dan origen a las altas concentraciones de arsénico en el acuífero de la Comarca Lagunera (México), se llevaron a cabo estudios geoquímicos del agua subterránea y los sedimentos. Los resultados de la geoquímica de los sedimentos indican que el arsénico disponible se encuentra principalmente adsorbido en los óxidos de Fe amorfos y cristalinos. Los resultados de la geoquímica del agua subterránea indican: 1) intercambio catiónico entre el calcio y el sodio; 2) disolución de calcita debido al intercambio catiónico; 3) aumento del pH debido a la disolución de la calcita, y 4) altas concentraciones de arsénico debido a elevados valores de pH.

**Palabras clave:** agua subterránea, sedimento, arsénico, óxidos de hierro, pH.

## Introducción

A principios de la década de 1960, las instituciones de salud de México reportaron problemas de salud en gente y animales en la Comarca Lagunera, en los estados de Coahuila y Durango, México, debido al consumo de agua subterránea con elevadas concentraciones de arsénico. El agua provenía del acuífero aluvial que representaba la principal fuente de abastecimiento para más de dos millones de personas que habitaban en la zona. Estudios

## Abstract

MEJÍA-GONZÁLEZ, M.A., GONZÁLEZ-HITA, L., BRIONES-GALLARDO, R., CARDONA-BENAVIDES, A. & SOTO-NAVARRO, P. Mechanisms that release arsenic to the groundwater of the Laguna Region, states of Coahuila and Durango, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. V, No. 1, January-February, 2014, pp. 71-82.

In order to elucidate the processes that causes high concentrations of arsenic in the aquifer of the Comarca Lagunera were conducted geochemical studies of groundwater and sediment. The results of the sediment geochemistry indicate that arsenic is mainly adsorbed on amorphous and crystalline Fe oxides. The results of the groundwater geochemistry indicate: 1) Cation Exchange between calcium and sodium, 2) Dissolution of calcite due to cation exchange, 3) Increase in pH due to the dissolution of calcite, and 4) high concentrations of arsenic due to elevated pH values.

**Keywords:** groundwater, sediment, arsenic, Fe oxides, pH.

realizados (Cinvestav, 1986; IMTA, 1992) delinearon extensas áreas de la Región Lagunera donde las concentraciones de arsénico estaban por arriba de 25 µg/l, nivel máximo recomendado en la NOM-127-SSA1-1994, modificada en 2000 para agua de consumo humano.

Con el fin de comprender el comportamiento geoquímico del arsénico y otros componentes del agua subterránea, se han llevado a cabo diversos estudios hidrogeoquímicos e isotópicos (SICYGSA, 2000; Ortega, 2003; Molina, 2004). Molina considera en su trabajo que los altos

valores de arsénico en el agua subterránea son producidos por una combinación de reacciones de disolución de óxidos de Fe y desorción debido a elevados valores de pH. SICYGSA, en su trabajo, sugiere que la desorción de As en función del pH del agua subterránea constituye un importante proceso de movilización, ya que detectó una buena relación entre el As disuelto y el pH. Ortega, en su investigación, realizada en la laguna de Viesca, encontró valores bajos de arsénico en el acuífero carbonatado y altos en el agua del acuitardo arcilloso.

Tales estudios analizan sólo los constituyentes químicos del agua subterránea, sin abordar la geoquímica de los sedimentos del

acuífero. En este estudio se abordan tanto la geoquímica de los sedimentos como la del agua subterránea, a fin de identificar los mecanismos que influyen en la movilización del arsénico.

### Área de estudio

La zona de estudio está ubicada en la parte septentrional de la república mexicana, y ocupa las porciones suroeste del estado de Coahuila y noreste del estado de Durango, México (figura 1). Esta región se encuentra enclavada en la Comarca Lagunera, entre los paralelos 25° 15' 00" y 26° 15' 00" de latitud norte y entre los meridianos 102° 40' 00" y 104° 00' 00" al oeste de Greenwich.

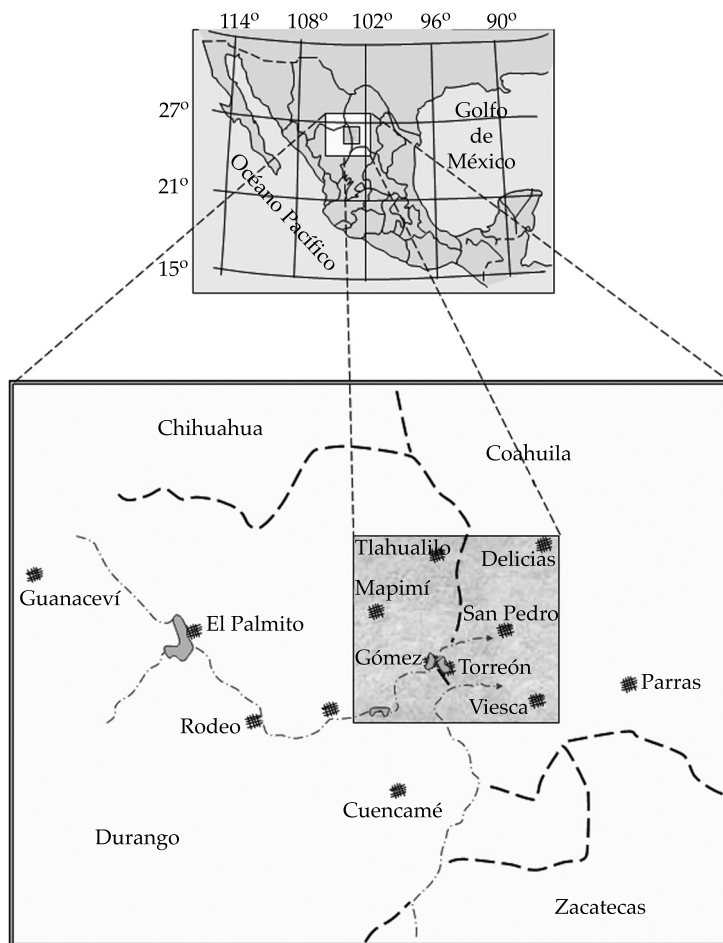


Figura 1. Localización del área de estudio.

Las formaciones geológicas de la Comarca Lagunera datan del Paleozoico (“formación Rodeo”) al reciente aluvión cuaternario (Álvarez, 1961; Tamayo, 1982). La cuenca se compone tanto de depósitos sedimentarios (calizas, dolomitas, yeso, arenas arcillosas y conglomerados) como de rocas ígneas (depósitos volcánicos y granito). La sucesión geológica (INEGI, 1988) comprende: (1) la formación Jurásica, “Minas Viejas”, con yeso, lutitas y calizas; (2) la formación Cretácica, “Aurora” con calizas y dolomitas, “Indura” compuesta de lutitas, calizas y limonitas (Tardy, 1974), “Caracol” con lutitas, arcillas y arenas; (3) la formación Terciaria “Ahuichila” compuesta de calizas y conglomerados, y “Santa Inés”, también formada de calizas y conglomerados, con una matriz de arcilla impermeable; y (4) El Aluvión Cuaternario, que conforma el acuífero granular de la región (figura 2).

La Comarca Lagunera es una cuenca endorreica alimentada por los ríos Nazas y Aguanaval: (1) el Nazas, con 220 km de longitud, drena la zona oeste con una cuenca de 60 000 km<sup>2</sup>, abarcando los estados de Coahuila y

Durango. El flujo medio anual es de  $1.1 \times 10^9$  m<sup>3</sup> y es regulado por las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco (PIFSV-SARH, 1991); (2) el río Aguanaval, con 305 km de longitud, drena la parte sureste con una cuenca de 25 500 km<sup>2</sup>. El flujo medio anual es de  $1.6 \times 10^8$  m<sup>3</sup> (PIFSV-SARH, 1991).

La temporada de lluvias comprende unos cuatro meses, entre junio y septiembre, con una precipitación media anual de 200-300 mm (PIFSV-SARH, 1991). La temperatura media anual es de 20.6 °C. La circulación del agua subterránea en general es hacia el noreste, de las sierras hacia el valle (figura 3).

## Metodología

### Geoquímica de los sedimentos

Se tomaron cuatro muestras de sedimentos aluviales subsuperficiales localizadas a lo largo de la trayectoria del río Nazas (figuras 4 y 5). El muestreo se efectuó siguiendo la dirección del cauce del río y seleccionando aquellos sitios donde fuera posible construir

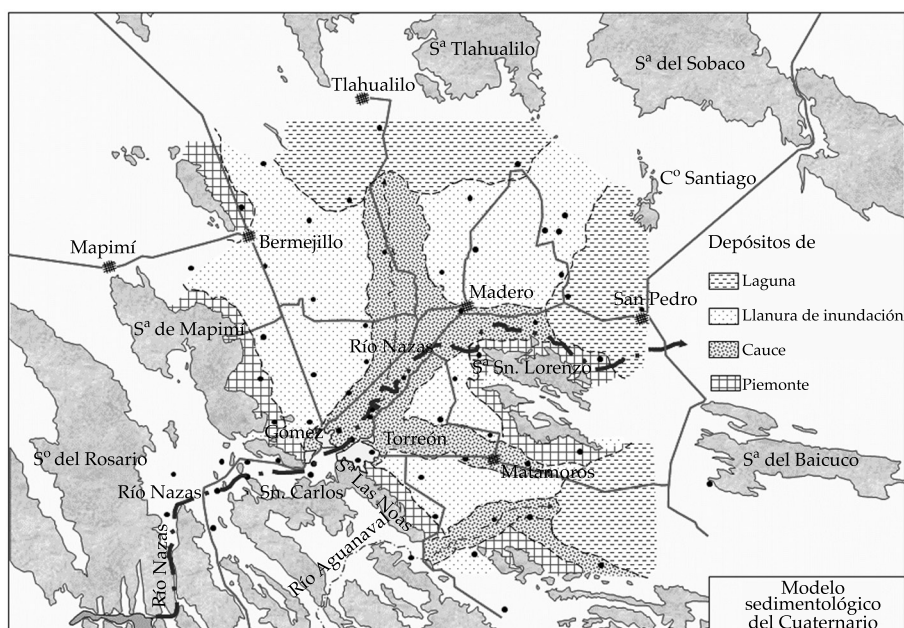


Figura 2. Modelo sedimentológico del aluvión del cuaternario.

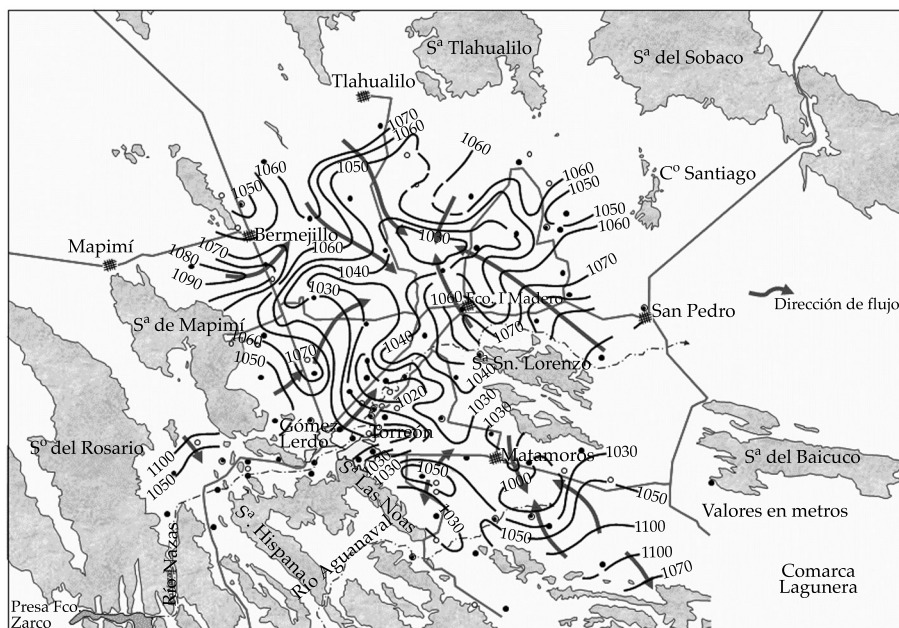


Figura 3. Flujo del agua subterránea.

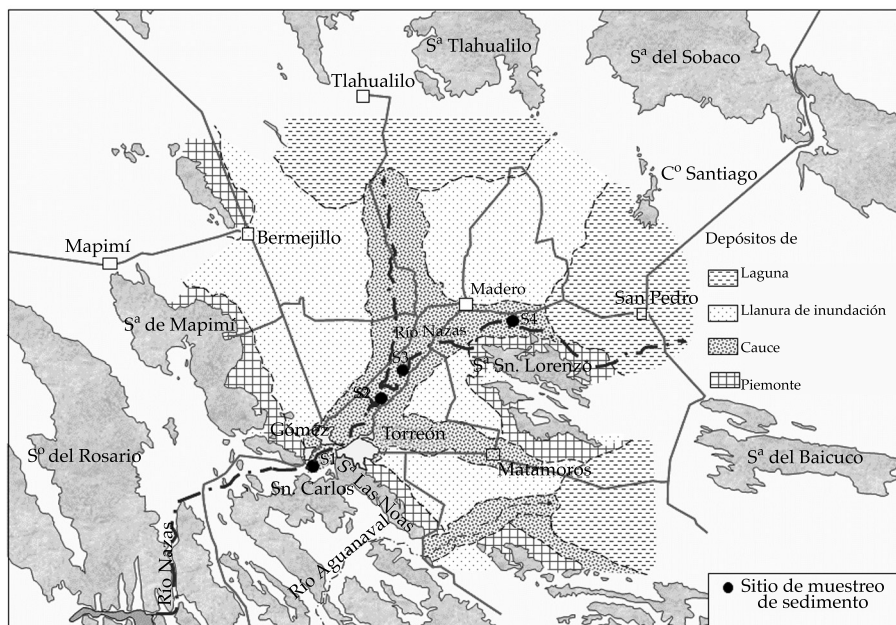


Figura 4. Sitios de muestreo del sedimento de cauce.

un perfil sobre una pared aluvial no alterada, que contuviera muestras representativas de la deposición aluvial. Las coordenadas

geográficas (UTM) de las muestras se indican en el cuadro 1 y se representan con la letra S, seguida de un número arábigo asignado en

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo de sedimento.

Clave	Referencia física	X	Y	Z (m)
S1	Constructora Domin. de México	648733	2822764	1130
S2	Ejido Villa Unión	658785	2835077	1116
S3	Ejido La Concha	662286	2838006	1117
S4	Ejido Santa Mónica	680734	2849560	1106



Figura 5. Perfil del punto de muestreo S2 Ejido Villa Unión.

orden descendente con respecto a la carga hidráulica de la esorrentía.

Las muestras se secaron en una estufa a 35 °C por 48 h. Posteriormente se homogeneizaron, cuartearon y tamizaron a una malla de 60 (dp < 250 µm). El análisis de la extracción secuencial del arsénico se realizó sobre la fracción granulométrica anteriormente referida.

Alas muestras se les aplicó un procedimiento de extracción secuencial (ES) de siete pasos, para evaluar el fraccionamiento del arsénico (As) y su potencial de movilización. Se utilizó el protocolo propuesto por Vázquez (2007), que presenta modificaciones de los protocolos de Keon *et al.* (2001) y Tessier *et al.* (1979). En este protocolo se distinguen las siguientes fracciones mineralógicas, en las cuales puede estar asociado el arsénico: fracción soluble (SOL), fracción adherida iónicamente (INTC), fracción asociada con carbonatos (CAR),

fracción asociada con las fases amorfas de hierro (INTA), fracción asociada con óxidos de hierro y manganeso cristalinos (OFM), fracción asociada con materia orgánica y sulfuros (MOS), y la fracción residual (RES).

Una vez preparada la muestra, se coloca en un vial cónico para comenzar con el protocolo de ES mediante el procedimiento siguiente: para la fracción SOL, la muestra se pone en contacto durante 20-min con agua deionizada a pH 5.5. El sobrenadante se centrifuga y se le realizan análisis químicos. La INTC consta de tres extracciones secuenciales sobre el sedimento recuperado de la fracción soluble con soluciones a 0.5 M de NaNO<sub>3</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y MgCl<sub>2</sub>. Los tiempos de contacto para cada extracción son de 20 min y entre cada extracción el sobrenadante se centrifuga y se le realizan análisis químicos; el reporte de esta fracción es la sumatoria de la concentración obtenida con cada agente extractante. Para la CAR, el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto por 5 h con una solución de CH<sub>3</sub>COONa (1 M) a pH 5.0, ajustado con CH<sub>3</sub>COOH concentrado. El sobrenadante se separa por centrifugación y se le realizan análisis químicos. En la INTA, el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto con una solución de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (1 M) durante dos ciclos de 24 h, centrifugando el sobrenadante y realizándole análisis químicos entre cada ciclo de extracción. Para la determinación de la OFM, el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto por 20-min con una solución de NH<sub>2</sub>OH\*HCl (0.04 M) aforado con CH<sub>3</sub>COOH al 25% v/v; esta etapa se realiza en un baño maría durante 6 h a 96 °C en un sistema de reflujo semicerrado. El sobrenadante se recupera por centrifugación

y se le realizan análisis químicos; para la MOS, el sedimento recuperado de la fracción anterior se pone en contacto con  $H_2O_2$  al 30% a pH 2.0 durante dos ciclos: el primero de 2 h y el segundo de 3 h a 85 °C; posteriormente se agrega una solución de acetato de amonio aforada con  $HNO_3$  al 20% y se agita durante 20-min; el sobrenadante se centrifuga y se le realizan análisis químicos; finalmente, para la RES, el sedimento recuperado se somete a digestión ácida en un sistema de microondas, utilizando como extractante una solución de  $HNO_3/HCl$  relación 3:2 Vol/Vol.

Como control de calidad para los análisis, se utilizó el material estándar de referencia NIST 2710. El porcentaje de recuperación de arsénico obtenido durante las diversas pruebas realizadas al estándar de referencia NIST 2710 fue de ~ 90%.

### Geoquímica del agua subterránea

Se tomaron muestras de agua de pozos localizados en los depósitos de cauce, debido a que las muestras de sedimento analizadas

corresponden a este tipo de depósitos. La localización de los puntos de recolección se muestra en la figura 6.

Los parámetros medidos en campo fueron temperatura del agua y del ambiente (T), potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica. En laboratorio se determinaron metales, aniones y parámetros químicos perecederos.

La colecta de las muestras de agua para análisis de laboratorio se realizó en el tren de descarga de los pozos. Antes de medir los parámetros de campo y recolectar las muestras, se bombeó tres veces el volumen del pozo y se aseguró que los diversos parámetros se estabilizaran.

Las muestras de agua recolectadas fueron envasadas en botellas de polietileno de alta densidad, evitando el contacto de la muestra con la atmósfera. Las muestras para metales se acidificaron a  $pH < 2$  con ácido nítrico de alta pureza. Las muestras para aniones se preservaron únicamente a 4 °C.

Con la finalidad de limitar al máximo la modificación de las propiedades fisicoquími-

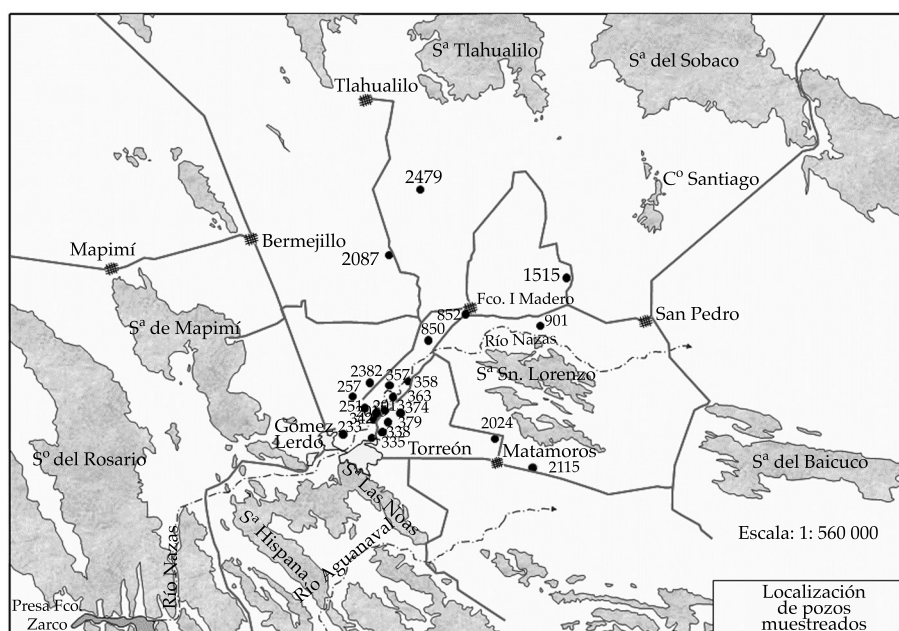


Figura 6. Localización de los pozos muestreados.

cas prevalecientes del agua subterránea; el procedimiento utilizado para la medición de los parámetros de campo incluyó la utilización de celdas de aislamiento. Estos dispositivos se conectan por medio de mangueras de diámetro pequeño a alguna válvula ubicada en el tren de descarga del pozo o en la descarga directa del mismo, como es el caso de pozos que tienen descarga libre. De este modo, el agua extraída fluye en forma continua e inalterada en el interior de la celda, lo que permite la introducción de los electrodos de medición respectivos (T, pH, CE) y llevar a cabo las mediciones. Este dispositivo permite además mayor facilidad para la estabilización de las lecturas, especialmente en las mediciones de pH.

## Resultados y discusión

### Geoquímica de los sedimentos

En la figura 7 se presenta la concentración total del As, definida a partir de la sumatoria de cada una de las fracciones determinadas en la extracción secuencial. Se aprecia el

incremento de arsénico desde 11 hasta 22 mg/kg. Datta y Subramanian (1997) reportan que la concentración de arsénico en los sedimentos de los ríos en Bangladesh es de 1.2 a 5.9 mg/kg. En términos de la población afectada, el problema del arsénico en el agua subterránea de los acuíferos de Bangladesh representa uno de los casos más serios en el mundo. Como se puede apreciar en los datos arriba mencionados, el contenido de arsénico en el sedimento del río Nazas es más alto que el de los ríos de Bangladesh.

En la figura 8 se muestra el fraccionamiento del arsénico. Como se puede observar, el arsénico potencialmente disponible va del 36 al 55% y la mayor parte está asociada con las fracciones de hierro amorfo (INTA), y las fracciones de hierro y manganeso cristalinas (OFM).

### Geoquímica del agua subterránea

En el cuadro 2 se presentan los valores de los parámetros físico-químicos medidos en campo y laboratorio del agua de los pozos.

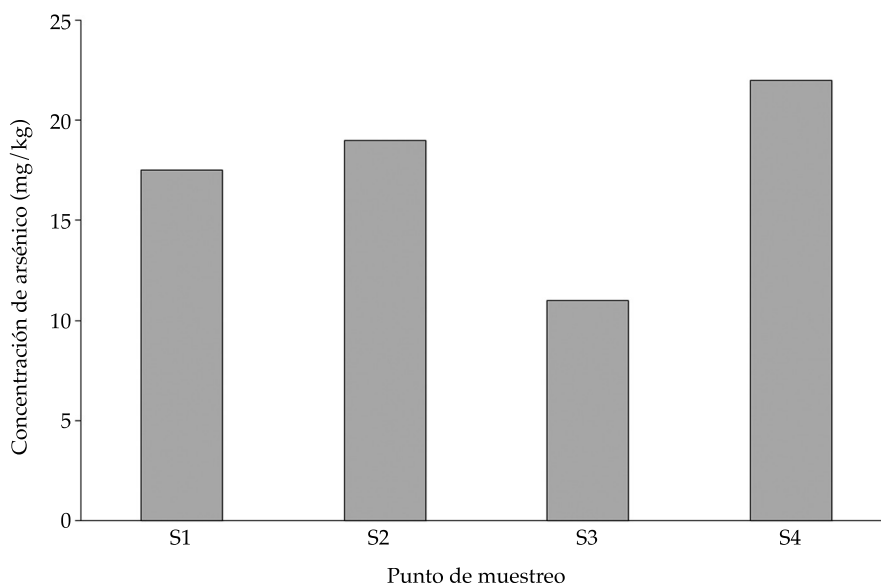


Figura 7. Concentración total del arsénico en los sedimentos.



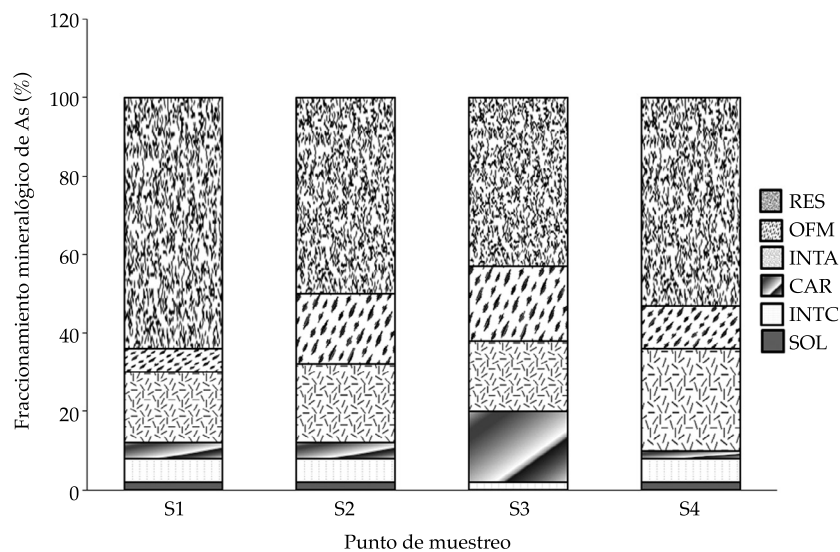


Figura 8. Porcentaje de arsénico por fracción mineralógica.

Cuadro 2. Parámetros físico-químicos del agua subterránea de la Comarca Lagunera.

Pozo	pH	As (µg/l)	Na(mg/l)	Ca(mg/l)	Mg(mg/l)	SO <sup>4</sup> (mg/l)	HCO <sup>3</sup> (mg/l)	Temp (°C)
233	8.04	16.27	49.3	120.95	19.3	306.4	122.1	28
251	7.7	2.58	42.7	84.55	8.85	185.07	124.44	23.9
257	8.04	5.34	63.1	231.6	22.77	580.9	95.2	26
331	8.65	304	128.7	3.73	1.25	44.4	259.86	28.8
336	7.92	2.43	45.2	73.4	11.3	143.78	173.24	23.5
338	7.96	4.7	36.8	49.35	5.13	92.19	168.36	22
342	7.92	4.58	40.1	95.95	8.64	74.43	262.57	24.9
357	7.85	25.3	41.2	28	2.4	49.5	151.28	27.8
363	7.9	25.1	32.7	28.36	1.76	29.37	146	26.1
368	8.11	52	50.9	21.61	0.72	35.55	161.1	29.2
374	7.68	2.96	44.8	63.1	6.7	146.07	141.52	25.1
379	8.08	4	39.8	55.41	6.13	96.53	132.98	25
504	8.05	13.9	98.1	95.6	6	236.28	112.24	27
520	7.92	6.43	44	34.68	4.91	76.03	194.1	24.3
852	7.93	27.3	51.8	25.99	0.77	66.26	131.8	28
1 125	8.13	108	107	29.96	1.76	213.6	131.76	30
1 515	8.11	165.2	244	43.97	1.73	272.12	90.3	35
2 016	8.24	198.5	96.8	27.74	2.62	80.87	226.9	27.4
2 024	8.12	142.2	225.5	117.2	14.79	529.62	136.6	26.1
2 087	8.13	35.36	62.4	21.68	0.67	74.4	124.5	30.6
2 115	8.16	97.65	163.4	40	4.56	304.76	112.2	30.9
2 382	7.89	3.4	43.7	66.76	6.64	83.91	168.36	24.6
2 479	8.28	175	88.8	15.25	0.6	84.85	146.4	30.5

Cuadro 2 (continuación). Parámetros físico-químicos del agua subterránea de la Comarca Lagunera.

Pozo	Alcalinidad (mg/l)	STD (mg/l)	K (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	Fe (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	Error % balance iónico
233	100	560	5.85	1.74	21.04	0.04	18.01	5.04
251	102	600	5.58	0.42	24.86	0.04	15.21	2.66
257	78	899	7.33	1.05	56.87	0.55	21.65	3.55
331	251	500	2.35	1.48	4.3	0.04	3.97	5.69
336	142	700	7.5	0.27	22.23	0.04	34.16	2.24
338	138	450	5.18	1.08	12.1	0.04	12.18	4.13
342	215	460	5.16	1.77	44.73	0.08	22.03	1.86
357	124	340	4.1	0.93	6.34	1.29	7.86	2.72
363	120	240	3.44	0.74	4.74	3.72	7.01	1.06
368	132	220	2.34	1.97	6.05	0.04	4.73	1.99
374	116	600	5.92	0.46	21.66	0.04	15.38	1.41
379	109	400	5.35	0.07	20.1	0.04	20.27	3.90
504	92	800	3.23	0.63	23.14	1.285	21.52	10.27
520	159	360	3.25	1.21	7.94	0.08	14.64	9.36
852	108	250	1.42	1.46	6.39	0.04	7.54	0.93
1 125	108	600	2.23	1.49	19.73	0.04	2.01	6.01
1 515	74	930	4.95	3.46	192.29	0.04	2.11	2.00
2 016	186	370	3.82	2.1	8.55	0.04	6.69	2.29
2 024	112	920	4.01	3.5	46.46	0.04	90.9	7.62
2 087	102	262	62.4	1.33	5.33	0.04	4.9	9.74
2 115	92	591	1.89	2.86	43.29	0.04	4.24	0.64
2 382	138	500	4.79	0.11	11.33	0.04	6.14	10.07
2 479	120	420	1.72	2.63	17.25	0.04	2.93	0.68

### Intercambio catiónico

En la figura 9 se muestra el diagrama de Piper de los parámetros físico-químicos. Se observa una evolución de agua cálcica hacia agua sódica. Este proceso se conoce como intercambio catiónico, donde el calcio del agua subterránea se intercambia con el sodio de las arcillas.

La superficie de las arcillas presenta cargas negativas, las cuales atraen cationes en una capa exterior, difusa, en equilibrio dinámico con la solución. Los cationes adsorbidos están débilmente unidos y pueden llegar a intercambiarse con otros cationes de la solución. El cambio se producirá cuando un catión en el agua tenga más fuerza de adsorción y desplace a otros que estaban adheridos a las arcillas.

Los divalentes son adsorbidos más fuerte que los monovalentes, y dentro de cada grupo tienen mayor fuerza los de menor radio iónico hidratado. La secuencia de mayor a menor fuerza es  $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+ > Li^+$ .

### Disolución de calcita

Un agua en equilibrio con calcita cumple el siguiente producto:

$$(Ca^{++}) \cdot (CO_3^{-}) = K_{CaCO_3}$$

Al disminuir el calcio, el producto de la actividad de la ecuación es menor que el de la constante, lo cual promueve la disolución de la calcita.

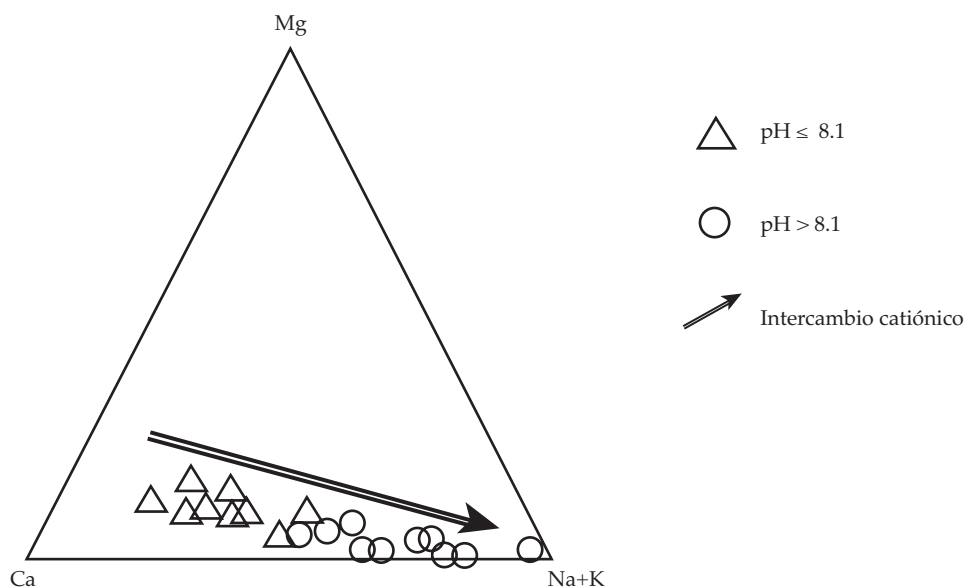
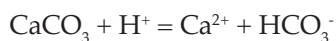


Figura 9. Diagrama de Piper de los parámetros químicos del agua subterránea de la Comarca Lagunera.

La disolución se lleva a cabo por medio de la siguiente reacción:



lo cual consume iones de hidrógeno, produciendo un aumento del pH, dado que son inversamente proporcionales. En la figura 9 se aprecia que al disminuir el calcio (círculos) aumenta el pH.

#### Desorción del arsénico

Los valores de arsénico contra pH se muestran en la figura 10. Como se puede observar, las muestras de agua que tienen un valor de pH menor de 8.1 tienen un contenido de arsénico bajo. Sin embargo, cuando el pH es mayor de 8.1, el valor del arsénico aumenta de forma considerable y sobrepasa el límite permisible (modificación a la NOM-127-SSA1-1994) de 25 µg/l.

El arsénico se adsorbe a la superficie de una gran variedad de materiales que conforman los acuíferos, incluyendo óxidos de hierro, óxidos de aluminio y minerales

de arcilla (Dzombak y Morel, 1990). Éste se adsorbe muy fuerte a las superficies de los óxidos de hierro en aguas ácidas o con un pH neutral (Waychunas *et al.*, 1993; Dzombak y Morel, 1990), y se desadsorbe cuando el pH se vuelve alcalino (Fuller y Davis, 1989; Dzombak y Morel, 1990). Esto se debe a que la carga neta de la superficie de los óxidos de hierro cambia de positiva a negativa conforme el pH se incrementa (Dzombak y Morel, 1990). Cuando los valores de pH son mayores de ~8, la carga neta de la superficie de los óxidos de hierro se vuelve negativa y repele los iones con carga negativa, tales como el arsénico. Como lo muestra la figura 8, en los sedimentos de cauce, el arsénico se encuentra principalmente adsorbido a los óxidos de Fe y se desprende cuando el pH es mayor de 8.1 (figura 10).

#### Conclusiones

La información geoquímica del sedimento y el agua subterránea ha permitido obtener los siguientes resultados:

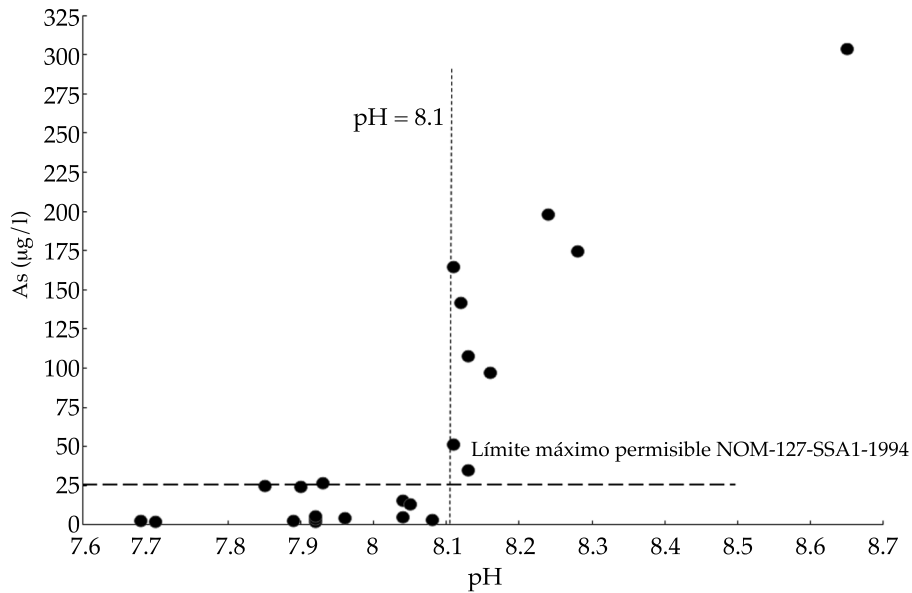


Figura 10. Contenido de arsénico contra valor de pH.

1. Los sedimentos de cauce contienen arsénico en altas cantidades (11-22 mg/kg).
2. En los sedimentos de cauce, el arsénico potencialmente disponible va del 36 al 55%. De esta cantidad, la mayor parte está asociada con las fracciones de hierro amorfo (INTA) y las fracciones de hierro cristalinas (OFM).
3. Las muestras de agua presentan una evolución de agua cálcica hacia agua sódica debido a intercambio catiónico entre el calcio del agua y el sodio del sedimento.
4. Al disminuir el calcio en el agua se produce disolución de la calcita, lo cual aumenta el pH.
5. Al aumentar el pH a valores mayores de 8.1, la carga neta de la superficie de los óxidos de hierro se vuelve negativa, y repele los iones de arsénico que también tienen carga negativa.
6. Se concluye que el mecanismo que controla la liberación del arsénico de los sedimentos de cauce al agua subterránea es el pH.

## Agradecimientos

El estudio de los sedimentos fue financiado por los Fondos Sectoriales de Investigación y Desarrollo sobre el Agua patrocinados por Conacyt-Conagua.

Recibido: 24/04/12

Aceptado: 19/05/13

## Referencias

- ÁLVAREZ, J.M. Provincias fisiográficas de México. Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 34, núm. 2, 1961, 17 pp.
- CINVESTAV. *Estudio de calidad del agua para la identificación de compuestos arsenicales en la Comarca Lagunera*. Informe técnico. México, D.F.: Dirección de Calidad del Agua, Comisión Nacional del Agua, 1986.
- DATTA, D.K., SUBRAMANIAN, V. Texture and mineralogy of sediments from the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system in the Bengal basin, Bangladesh and their environmental implications. *Environ. Geol.* Vol. 30, 1997, pp. 181-188.
- DZOMBAK, D.A. and MOREL, F.M. *Surface complexation modeling-Hydrous ferric oxide*. New York: John Wiley and Sons, 1990, 393 pp.

- FULLER, C.C., and DAVIS, J.A. Influence of coupling of sorption and photosynthetic processes on trace element cycles in natural waters. *Nature*. Vol. 340, 1989, pp. 52-54.
- INEGI. *Carta hidrológica de aguas subterráneas*. Torreón, México: Dirección General de Geografía del Territorio Nacional, 1988, G13-9 (escala 1/250 000).
- IMTA, 1992. *Estudio hidrogeoquímico e isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera*. Informe técnico. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- KEON, N.E., SWARTZ, C.H., BRABANDER, D.J., HARVEY, C., and HEMOND, H.F. Validation of an arsenic sequential extraction method for evaluating mobility in sediments. *Environmental Science & Technology*. Vol. 35, 2001, pp. 2778-2784.
- MOLINA, A. *Estudio hidrogeoquímico en la Comarca Lagunera, México*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
- ORTEGA A. Origin and geochemical evolution of groundwater in a closed-basin clayey aquitard, Northern México. *Journal of hydrology*. Vol. 284, 2003, pp. 26-44.
- PIFSV-SARH. *Estadística de la producción agropecuaria y forestal y su valor de los ciclos otoño-invierno y primavera-verano*. Cd. Lerdo, México: SARH Subdelegación de la Política y Concertación, Unidad de Información y Estadística, 1991.
- SICYGSA. *Estudio de la contaminación difusa del acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila*. México, D.F.: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Conagua, 2000.
- TAMAYO, J.L. *Geografía moderna de México*. México, D.F.: Editorial Trillas, 1982.
- TARDY, M. *Les grands traits structuraux du secteur transverse de Parras, Sierra Madre Oriental, Mexique*. Conference Géologique des Caraïbes VII, Saint Francois, 1974, pp. 595-605.
- TESSIER, A., CAMPBELL, P.G.C., and BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*. Vol. 51, 1979, pp. 844-851.
- VÁZQUEZ, R.G. *Mobilización de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la rizósfera de Viguiera Dentata. Una especie vegetal tolerante, de suelos de Villa de La Paz, Matehuala, S.L.P.* Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2007.
- WAYCHUNAS, G.A., REA, B.A., FULLER, C.C., and DAVIS, J.A. Surface chemistry of ferrihydrite - Part 1- EXAFS studies of the geometry of coprecipitated and adsorbed arsenate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 57, 1993, pp. 2251-2269.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Miguel Ángel Mejía-González

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
 Coordinación de Hidrología  
 Subcoordinación de Hidrología Subterránea  
 Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso  
 62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
 Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 217  
 Fax: +52 (777) 3293 682  
 mamejia@tlaloc.imta.mx

Fís. Luis González-Hita

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
 Coordinación de Hidrología  
 Subcoordinación de Hidrología Subterránea  
 Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso  
 62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
 Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 805  
 Fax: +52 (777) 3293 682  
 lghita@tlaloc.imta.mx

Dr. Roberto Briones-Gallardo

Dr. Antonio Cardona-Benavides

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
 Dr. Manuel Nava 8  
 78290 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO  
 Teléfono: +52 (444) 8262 330, extensión 2105

M.C. Pedro Soto-Navarro

Comisión Nacional del Agua, México  
 Av. Insurgentes Sur # 2416  
 Colonia Copilco el Bajo, delegación Coyoacán  
 04340 México, D.F., MÉXICO  
 Teléfono: +52 (55) 5174 4000