

# COMPORTAMIENTO DEL ARSÉNICO EN SUELOS DE LA REGIÓN LAGUNERA DE COAHUILA, MÉXICO

## Behavior of Arsenic in Soils of the Region Lagunera of Coahuila, Mexico

Guillermo Hernández Ordáz<sup>1</sup>, Miguel A. Segura Castruita<sup>2†</sup>, Lerae C. Álvarez González Pico<sup>2</sup>, Rogelio A. Aldaco Nuncio<sup>2</sup>, Manuel Fortis Hernández<sup>2</sup> y Guillermo González Cervantes<sup>3</sup>

### RESUMEN

El estudio del arsénico (As) en la región Lagunera se ha centrado en la calidad y recuperación del agua extraída del subsuelo, que contiene altas concentraciones ( $> 0.20 \text{ mg L}^{-1}$ ) del mismo. Diferentes investigaciones han establecido que la adición de fertilizantes fosfatados en suelos agrícolas, favorece la disponibilidad del As en la solución del suelo. Sin embargo, el conocimiento del comportamiento de este metaloide en suelos agrícolas de la región Lagunera, es escaso. Por lo anterior, los objetivos de esta investigación fueron determinar la concentración de arsénico disponible en diferentes suelos de la región y evaluar su comportamiento después de la adición de fósforo soluble. Se describieron cuatro perfiles de diferentes suelos agrícolas, con el fin de captar la mayor variabilidad del metaloide en suelos de la región; tres columnas de cada perfil fueron empleadas como permeámetros para verificar el movimiento vertical del As, después de adicionar fósforo (P) y láminas de riego simulando el manejo agrícola. Los suelos fueron caracterizados física y químicamente; el contenido de As inicial se determinó por el método de espectroscopía por generación de hidruros; así como el As disponible final de cada horizonte de los permeámetros; además de la concentración de fósforo soluble final. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y a una prueba de medias con Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Los resultados mostraron que al agregar P a los suelos agrícolas de la región Lagunera, el As disponible en la capa

superficial (0-30 cm) se incrementó hasta un 662%; aunque este metaloide no rebasó los niveles permisibles que dañen la salud humana, de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

**Palabras clave:** arseniato, contaminación.

### SUMMARY

Research on arsenic in the Lagunera region has focused on quality and recovery of extracted groundwater, which contains high concentrations ( $> 0.20 \text{ mg L}^{-1}$ ) of arsenic (As). Several studies worldwide have established that the addition of phosphate fertilizers in agricultural soils favors As availability in the soil solution. However, knowledge of the behavior of this metalloid in agricultural soils of La Laguna is scarce. The objectives of this study were to determine the concentration of arsenic available in different soils of the region and to evaluate the behavior of arsenic in soil after adding phosphorus (P). Four different agricultural soil profiles were described. Soil samples were collected and three columns of each profile were used as permeameters to verify vertical movement of As after adding phosphorus and irrigation levels simulating agricultural management. The soils were characterized physically and chemically; initial As content and final available As of each horizon of the permeameter were determined by the hydride generation spectroscopic method as well as soluble phosphorous concentration. Data were subjected to analysis of variance and Tukey comparison of means ( $P \leq 0.05$ ). The results show that addition of P to agricultural soils of La Laguna can increase available As in the topsoil (0-30 cm) up to 662%, without exceeding levels permitted by Mexican Standards NOM-147-SEMARNAT/SSA1 2004. This study will provide the basis for future research.

**Index words:** arsenate, pollution.

<sup>1</sup> Estudiante Maestría, <sup>2</sup> Maestro-Investigador, Instituto Tecnológico de Torreón, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carretera Torreón-San Pedro Km 75, ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México

<sup>†</sup> Autor responsable (dmilys5@hotmail.com)

<sup>3</sup> INIFAP-CENID-RASPA. Km 6.5 Margen derecha canal de Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

## INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un metaloide ampliamente distribuido en rocas, suelos, agua y aire (Järup, 2003). La presencia de este metaloide en la región Lagunera de Coahuila es de gran importancia para la sociedad desde el punto de vista ambiental (Iliná *et al.*, 2009), económico y de salud (García-Salcedo *et al.*, 2003); sin embargo, el estudio del As se ha centrado en el agua que se extrae del subsuelo, la cual presenta altas concentraciones ( $0.250 \text{ mg L}^{-1}$ ) de este elemento (García-Salcedo *et al.*, 2003; Castruita Ávila *et al.*, 2011). No obstante, el análisis integral del arsenicismo debe considerar a otros componentes del medioambiente como el suelo, ya que la ingestión de sus partículas con As no considera diferencias entre la disponibilidad de este elemento en agua y suelo (Ehler y Luthy, 2003). La presencia y acumulación de este elemento en el suelo es resultado de procesos geoquímicos y de actividades antropogénicas como la minería (fundición de minerales que contienen arsénico), la utilización de pesticidas en la agricultura, productos químicos para la preservación de madera, tiraderos ilegales de productos químicos y la quema de combustibles fósiles (Alam *et al.*, 2007) y puede permanecer en dos estados de oxidación, como arsenito ( $\text{AsO}_3$ ) o como arseniato ( $\text{AsO}_4$ ). Este último estado es el más habitual en condiciones de campo y laboratorio; además de ser el más susceptible de ser adsorbido por las partículas del suelo (Violante y Pigna, 2002). Por ello, los constituyentes del suelo juegan un papel importante en la movilidad del arsénico dentro de éste (Bissen y Frimmel, 2003) y en su disponibilidad en el sistema agua-suelo-planta (Zhao *et al.*, 2009). Al considerar que el ión fosfato y arseniato son similares en el suelo, ya que son adsorbidos específicamente en los minerales del suelo con carga variable como los óxidos de Al, Fe y Mo, alofano e imogolita (Liu *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 2002), la aplicación de fósforo en forma de fertilizante, afecta la concentración de As en la solución del suelo e incrementa la disponibilidad de este elemento para las plantas (Wijnhoven *et al.*, 2006). En las últimas décadas la industria y la introducción de nuevas tecnologías aplicadas a actividades de bajo impacto ambiental como la agricultura, han incrementado el riesgo de contaminación del suelo con este elemento (Ungaro *et al.*, 2008). La adición de fertilizantes fosfatados a suelos agrícolas, favorece la disponibilidad del As en la solución del suelo (Peryea, 1998); a tal grado que, la toxicidad por As para cultivos y humanos, puede

prevalecer cuando el As coexiste con baja disponibilidad de fósforo (Pigna *et al.*, 2010). El estudio del As en el suelo es importante, porque la ingestión accidental de suelo (por ejemplo, el consumo de polvo o suelo adherido a las manos) es una forma de exposición de los seres humanos a este metaloide, el cual depende de la disponibilidad del mismo (Bosso y Enzweiler, 2008). No obstante, investigaciones enfocadas al conocimiento del comportamiento del As, después de agregar fósforo en forma de fertilizante a los suelos de la región Lagunera, son escasas. Lo antes mencionado supone que el determinar la concentración de As disponible aunado a la adición de fósforo en suelos de la Laguna, aportaría elementos para una mejor comprensión del problema, lo cual contribuiría en la formulación de estrategias de manejo agrícola y ambiental. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron determinar la concentración de arsénico disponible en diferentes suelos de la región Lagunera y establecer el comportamiento del arsénico después de la adición de fósforo soluble.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El área de estudio se localizó entre los  $24^\circ 10'$  y  $25^\circ 56'$  N y  $101^\circ 16'$  y  $104^\circ 41'$  O (Figura 1), a una altitud de 1170 m. El clima es un Bw (h') hw (e) (García, 1988), que corresponde a un clima desértico seco con lluvias en verano y variabilidad extrema. La precipitación total anual promedio es 250 mm, concentrada principalmente en los meses de junio a septiembre. Esta precipitación contrasta con la evaporación total anual promedio de 2400 mm (García, 1988). Los municipios que se consideraron para la investigación en la región Lagunera de Coahuila fueron Francisco I. Madero, San Pedro y Torreón, debido a que en estas áreas se han reportado las mayores concentraciones de arsénico en aguas subterráneas (Rosas *et al.*, 1999).

### Metodología

El trabajo se dividió en cuatro etapas: 1) selección de sitios de muestreo y caracterización de suelos, 2) determinaciones en laboratorio, 3) determinación de As inicial y dinámica del As en el suelo y 4) análisis estadístico de los resultados.

**Selección de sitios de muestreo y caracterización de suelos.** Cuatro sitios dentro del área que ocupan

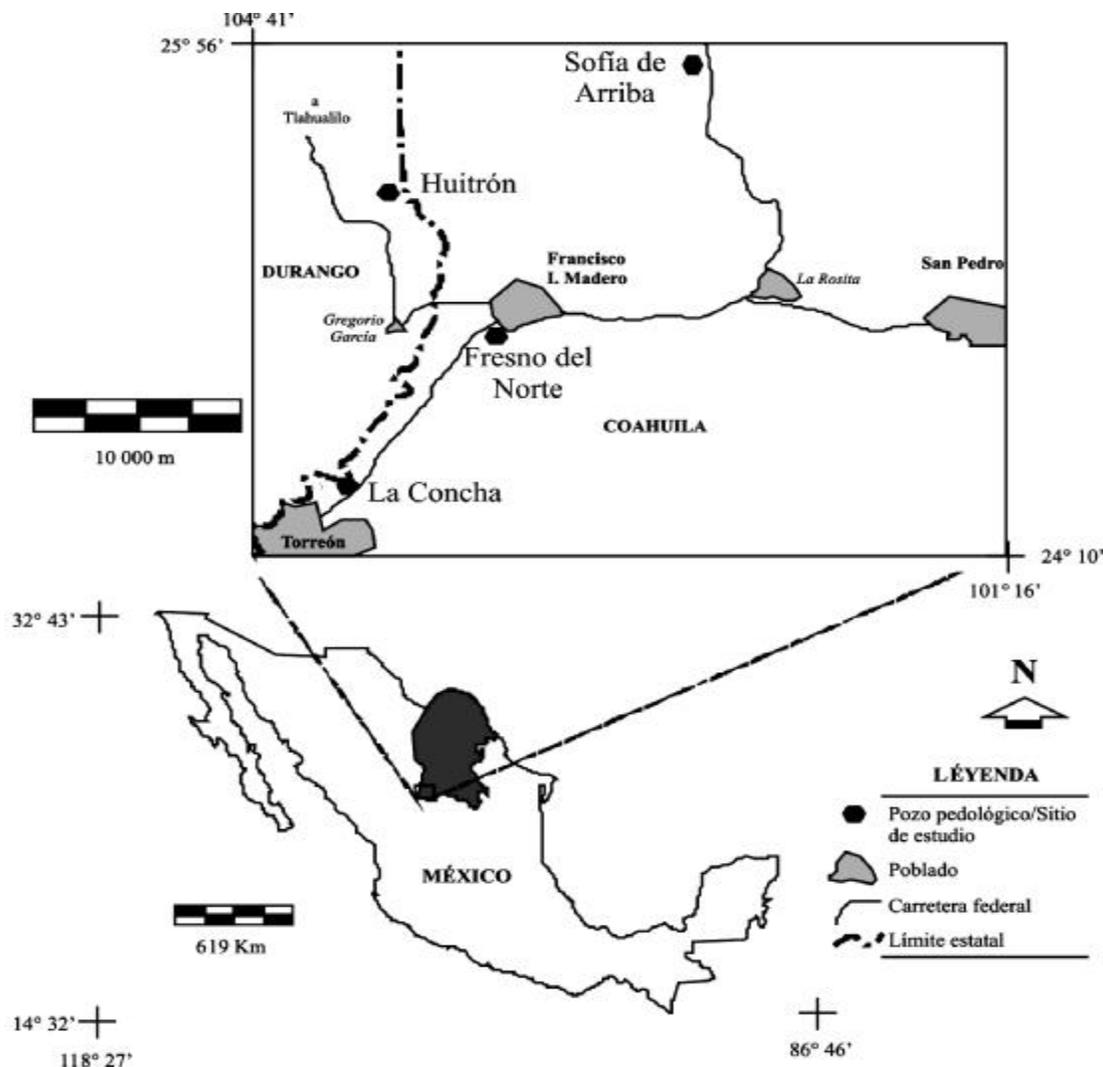


Figura 1. Área de estudio y ubicación de los diferentes sitios de los pozos pedológicos.

los municipios de Francisco I. Madero, San Pedro y Torreón, fueron seleccionados tomando como base el mapa de clases de suelo de Segura *et al.* (2012), siendo la condición principal, que se trataran de suelos agrícolas. Una vez seleccionados los sitios, un pozo pedológico fue excavado en cada uno de ellos, con el fin de caracterizar a los suelos en campo (Soil Survey Division Staff, 1993). Muestras de suelo (2 kg, aproximadamente) de cada horizonte fueron colectadas y analizadas para determinar sus características físicas y químicas con propósitos de clasificación. Los suelos fueron clasificados de acuerdo a la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (siglas en inglés WRB) (IUSS Working Group WRB, 2006). En cada sitio, se obtuvieron tres columnas de suelo de cada perfil (suelo inalterado), mediante tubos

de PVC de cuatro pulgadas de diámetro y una longitud de 90 cm, con el fin de evaluar la dinámica del As.

**Determinaciones en laboratorio.** Las muestras de suelo, secas a la sombra y a temperatura ambiente, fueron molidas y tamizadas (con malla de 2 mm de  $\varnothing$ ). Las determinaciones físicas y químicas de las muestras estuvieron basadas en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) para fines de clasificación de suelos. Las características que se obtuvieron fueron color, tamaño de partículas, densidad aparente, contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables y solubles, carbonatos y contenido de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ). El arsénico inicial se determinó en los suelos de cada

sitio y de sus respectivos horizontes, por el método de espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros, a 525 nm del complejo As-(dietilditiocarbamato), que se forma a partir de AsH<sub>3</sub> (arsina), obtenida después de la reducción del arsénico en una solución de Zn (SEMARNAT, 2007; Litter *et al.*, 2009; Iliná *et al.*, 2009). De cada horizonte se realizaron cuatro repeticiones. Aparte, se obtuvo la concentración de arsénico disponible en los horizontes después de agregar una solución fosfatada a una muestra de suelo y así obtener, previo análisis inicial, la desorción de arsénico con respecto al tiempo de reacción. Para esta etapa se utilizaron 2.5 g de suelo, seco y tamizado, que se colocaron en una bolsa de plástico de 100 cm<sup>3</sup> de capacidad, cada muestra se hizo por triplicado. Enseguida se agregó una solución fosfatada (0.25 ml), cuya fuente fue fosfato de amonio, su concentración de 200 mg L<sup>-1</sup>; la muestra de suelo con solución se llevó a capacidad de campo con agua destilada. Asimismo, a una muestra sólo se le agregó agua (como testigo). La bolsa con el suelo húmedo se introdujo en un tubo de ensayo de 100 cm<sup>3</sup> y se incubó a 30 °C durante 24 h, similar a la metodología que utilizó Rodríguez (1993) para el caso del fósforo, pero con la modificación que después de cada tiempo de incubación, a la muestra correspondiente, se le determinó el arsénico liberado a la solución del suelo.

**Dinámica del As en el suelo.** Esta etapa consistió en agregar a cada tubo de PVC, con suelo inalterado una solución fosfatada con una concentración de 200 mg L<sup>-1</sup>, similar a la del paso anterior, a manera de fertilizante. Cabe aclarar que no se consideró un testigo, puesto que se tomarían como base los resultados de Arsénico inicial que se obtuvieron en el paso anterior. Posteriormente, a cada tubo se le aplicó una lámina de agua de 80 cm, que correspondió a la lámina de riego de un cultivo de

la región. La lámina se dividió en tres aplicaciones en fechas diferentes (cada 30 días), en un lapso de noventa días. Transcurrido el tiempo, veinte días después, los tubos fueron cortados, respetando los diferentes espesores de los horizontes de cada suelo. Al suelo de cada horizonte se le determinó el As disponible (para nuestro caso final) para establecer el movimiento del arsénico dentro del perfil de suelo.

**Análisis estadístico de los resultados.** Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) y regresiones entre los resultados con el programa estadístico Minitab16 (Minitab Inc., State college, PA, USA).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de los Suelo

Los sitios que se seleccionaron en el área de estudio corresponden a cuatro clases de suelo (Cuadro 1). El relieve donde se encuentran es plano con pendiente entre 1 y 2%, sin microrelieves aparentes.

### Morfología del Suelo

Los suelos presentaron de seis a nueve capas u horizontes de suelo mineral, cuya transición es horizontal y marcada, debido a los cambios en textura y estructura. No se detectaron indicios de procesos pedogenéticos; lo que es, de acuerdo con Pape y Lager (1994), indicativo de un escaso o nulo desarrollo del suelo. En términos generales, la capa superficial de estos suelos presentan colores pardos 10YR 6/3 en seco y de pardo amarillentos 10YR 4/4 a pardo grisáceo oscuro 10YR 4/2 en húmedo. Un factor que puede influir en el color,

**Cuadro 1. Clasificación de los suelos del área de estudio y contenidos de arsénico (As) disponible inicial y final (después de agregar una solución fosfatada 200 mg L<sup>-1</sup> e incubar) en el horizonte superficial (0-30 cm).**

Sitio	Lugar	Nombre (WRB)	Arsénico disponible		Incremento
			Inicial	Final	
			----- mg kg <sup>-1</sup> -----		%
1	La Concha	Fluvisol cálcico-árido (FLccad)	0.64c <sup>†</sup>	4.88a	662
2	Huitrón	Fluvisol arido-háplico (FLadha)	0.95b	1.26d	33
3	Fresno del Norte	Fluvisol eutri-háplico (FLeuha)	1.23a	3.69b	200
4	Sofía de Arriba	Fluvisol eutri-háplico (FLeuha)	0.86bc	1.72c	100
	DMS		0.26	0.45	

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna de arsénico indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ); DMS = diferencia mínima significativa; WRB = Base Referencial Mundial de Suelos.

es el material parental y las condiciones de aridez (Brady y Weil, 1999) que prevalecen en la región. En la capa superficial y en algunos estratos u horizontes subsuperficiales la textura es franco arcillo arenosa, y en otros son francas, francas arenosas o franco limosas, ninguno presentó revestimientos laminares, lo que permite inferir el escaso movimiento de partículas por acción del agua. La presencia de arcilla en estos estratos actúa de manera aglutinante dando estabilidad al suelo (Sumner, 2000).

Estos suelos presentan texturas medias, cuentan con macroporos y microporos, dando como resultado un buen drenaje y aereación (Verdonck y Demeyer, 2004). La reacción que se produjo al agregar  $H_2O_2$  fue lenta y fuerte (burbujas de 3 a 5 mm de  $\emptyset$ ), pero conforme se incrementaba la profundidad del perfil la efervescencia disminuyó (reacción lenta y débil), lo cual es un indicativo de las condiciones hidromórficas (Stoops, 2010) a las que estuvieron sometidos los suelos de la región. El suelo de los horizontes del perfil del ejido La Concha, tuvo una reacción rápida y fuerte cuando se agregó ácido clorhídrico, situación que denota la presencia de carbonatos de calcio (Soil Survey Division Staff, 1993). La horizonación que los suelos presentan en este estudio fue Ap-Ak-Ck-Ck<sub>2</sub>-Ck<sub>3</sub>-Ck<sub>4</sub> (ejido La Concha), Ap-A-C-C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> (ejido Huitrón, Fresno y Sofía), lo que refleja que estos suelos se formaron por diferentes eventos de depósito de materiales (Pape y Lager, 1994).

**Características físicas y químicas de los suelos.** Los suelos del área de estudio presentaron clases texturales en las que dominan los francos, aunque en combinaciones de franco arenoso, franco arcillo arenoso y franco limosa. Sin embargo, la distribución del tamaño de partículas entre capas no presentó una secuencia en relación con la profundidad. De Paepe (1991) reporta que los procesos de sedimentación difíciles de definir se conocen como camas corrientes o laminación cruzada, las cuales se pueden formar por la acción del agua o el viento, lo que tiene relación con el modo de formación de estos suelos. La densidad aparente ( $D_a$ ) varía en promedio de 1.12 a 1.69 g cm<sup>-3</sup>, valores que se encuentran dentro del intervalo de suelos no compactados (Porta *et al.*, 2003); suelos que corresponden a texturas franca finas y arenosas.

El contenido de materia orgánica (MO) fue bajo (0.20-2.023%) y decrece irregularmente con la profundidad. De acuerdo a los contenidos de MO que establece Sumner (2000), los valores de MO de esta investigación son pobres, lo cual refleja la escasa o nula

aplicación de MO en forma de estiércol o abonos. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) varía de media (20 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) a baja (14.20 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) (SEMARNAT, 2002). Los horizontes subsuperficiales presentan una CIC de 17.4 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>. El catión más abundante es el calcio (9.8 a 22.17 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>), mientras que el magnesio (0.16 a 1.72 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>), potasio (0.35 a 3.37 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) y sodio (0.23 a 2.27 cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) se encuentran en cantidades bajas. Por ello la saturación de bases es de 100 %. Lo anterior está relacionado con el bajo número de cargas que estos suelos presentan y que se saturan rápidamente con los pocos cationes presentes.

**Clasificación de los suelos.** Los suelos se clasificaron como Fluvisoles (Cuadro 1), dentro de tres diferentes subunidades (Fluvisoles cálcico-áridicos, Fluvisoles aridiháplicos y Fluvisoles eutriháplicos) (IUSS Working Group WRB, 2006), lo que refleja como características importantes que están formados por sedimentos aluviales de texturas finas y se encuentran en zonas con pendientes generalmente suaves.

**El arsénico en los suelos.** La capa superficial de los suelos en estudio (0-30 cm de profundidad), presentan contenidos de arsénico disponibles bajos, que no se consideran como contaminantes (Cuadro 1), de acuerdo a lo que establece la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007) para este metaloide. Aunque, después de agregar una solución fosfatada a estos suelos, la cantidad de As se incrementó de manera diferente en cada uno de los suelos. No obstante, estos resultados son menores que los 22 mg kg<sup>-1</sup>, de arsénico en el suelo que indica la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), y que los 20 mg kg<sup>-1</sup> para suelos en otros países (ARSLAND, 2006), como valores máximos permisibles para la salud humana en suelos agrícolas.

Por otra parte, cuando se agregó fósforo a los diferentes suelos en estudio, la concentración de As se incrementó en proporciones que varían de 33 a 662%, comportamiento similar fue reportado por Álvarez-Benedí *et al.* (2003). El mayor porcentaje de incremento de As se alcanzó en el suelo de la Concha (662%), lugar donde se tuvo el menor contenido disponible inicial de este metaloide (0.64 mg kg<sup>-1</sup>); donde a su vez, se han reportado concentraciones altas de As en pozos de agua (Rosas *et al.*, 1999). Situación similar a lo establecido por Álvarez-Benedí *et al.* (2003), quienes indican que en zonas con suelos de concentraciones bajas de As, las aguas del subsuelo presentan niveles altos de este

metaloide, estableciendo una relación presencia-ausencia. Por otra parte, diferentes investigadores demostraron que las partículas de suelo influyen en la movilidad del arsénico dentro del suelo (Smith *et al.*, 2002; Bissen y Frimmel, 2003) y, por lo tanto, en su disponibilidad en el sistema agua-suelo-planta (Zhao *et al.*, 2009), lo cual se podría reflejar en las concentraciones de As en las aguas subterráneas. En función de lo anterior, es probable que la presencia de arsénico en los suelos, esté en función de la subunidad en la que se encuentre, si se considera que a nivel de subunidad, características químicas o mineralógicas de los horizontes del suelo determinan su pertenencia a algún nivel jerárquico dentro del sistema de clasificación (IUSS Working Group WRB, 2006). El Fluvisol calci-arídico (FLccad) tiene horizontes con concentraciones (de 11.3 a 14.5 %) de carbonato secundario o  $\text{CaCO}_3$ ; aparte,

presenta la mayor cantidad del ión calcio ( $22.17 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ ). Estas características también podrían estar influyendo en la existencia de arsénico en este suelo. García *et al.* (2010) indican que la presencia de arsénico se relaciona con la existencia de calcio en el suelo, puesto que el ión arseniato tiende a reaccionar con los iones calcio y formar arseniato de calcio (Navarro *et al.*, 2004). A diferencia del Fluvisol aridi-háplico (FLadha) donde no se presenta acumulación de calcio, sino que otra característica edáfica como el tipo de arcillas podría estar influyendo en la sorción y desorción del As (Bissen y Frimmel, 2003); ya que en los sitios de intercambio de los minerales secundarios se pueden adsorber los iones arseniatos (Smith *et al.*, 2002).

**Dinámica del arsénico en el perfil de suelo.** El incremento de arsénico (Cuadro 2), a través del perfil

**Cuadro 2. Arsénico (As) disponible en suelo de los diferentes horizontes de cada sitio.**

Suelo	Horizonte	Profundidad	A	L	R	Arsénico				Incremento
						P	Testigo	Inicial	Final	
		cm	%			mg kg <sup>-1</sup>				%
FLccad	Ap	0-11	68.3	13.4	18.4	164.89 a <sup>†</sup>	1.23 c	1.25 c	2.97 bc	138
	Ak	11-24	49.6	17.6	32.8	60.14 b	0.60 e	0.63 d	4.78 a	658
	Ck	24-37	47.5	16.2	36.3	7.21 c	1.01 d	0.99 d	3.49 b	253
	Ck <sub>2</sub>	37-63	68.8	9.3	21.9	2.68 c	2.08 a	2.10 a <sup>†</sup>	2.23 d	6.4
	Ck <sub>3</sub>	63-77	45.5	10.6	33.9	0.40 c	2.27 a	2.26 a	2.42 d	7.3
	Ck <sub>4</sub>	77-94	63.0	8.1	28.9	0.31 c	1.79 b	1.70 b	1.82 de	7.1
FLadha	Ap	0-17	42.2	38.6	19.2	173.61 a	0.96 cd	0.95 d	1.26 e	33
	A	13-33	48.8	32.0	19.2	65.33 b	0.68 de	0.70 d	3.51 b	401
	C	33-50	68.4	10.8	20.8	6.74 c	0.93 cd	0.91 d	2.30 d	153
	C <sub>2</sub>	50-72	58.0	22.8	19.2	0.62 c	0.88 d	0.88 d	0.94 e	7.8
	C <sub>3</sub>	72-91	52.6	1.0	46.4	0.85 c	0.80 de	0.82 d	0.87 e	6.5
FLeuha <sup>‡</sup>	Ap	0-37	44.6	21.8	33.6	168.41 a	1.25 c	1.23 c	3.69 b	200
	A	37-54	42.2	18.2	39.6	63.27 b	0.93 cd	0.94 d	3.10 bc	123
	C	54-70	45.8	30.2	24.0	8.43 c	0.84 cd	0.85 d	0.94 e	11
	2C	70-89	8.2	55.0	36.8	1.16 c	0.90 cd	0.90 d	0.98 e	9.1
	2C <sub>2</sub>	89-96	6.2	49.0	44.8	1.02 c	0.83 d	0.83 d	0.91 e	9.4
FLeuha <sup>§</sup>	Ap	0-10	35.2	24.8	40.0	154.56 a	0.86 cd	0.86 d	1.72 de	100
	A	10-27	38.3	25.2	36.5	52.12 b	0.97 cd	0.98 d	3.47 bc	255
	C	27-46	40.5	26.1	33.4	7.13 c	0.90 cd	0.90 d	2.03 de	126
	C <sub>2</sub>	46-66	38.5	20.7	40.8	3.31 c	1.15 cd	1.15 c	1.24 e	7.8
	C <sub>3</sub>	66-79	36.4	23.2	40.4	2.21 c	1.06 cd	1.07 c	1.15 e	7.9
	C <sub>4</sub>	79-98	36.9	28.3	34.8	1.95 c	0.94 cd	0.96 d	1.03 e	7.1
	DMS					23.47	0.48	0.43	0.65	

<sup>†</sup> Letras distintas en la misma columna de arsénico indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ); FLccad = Fluvisol calci-arídico; FLadha = Fluvisol aridi-háplico; FLeuha<sup>‡</sup> = Fluvisol eutri-háplico Fresno norte; FLeuha<sup>§</sup> = Fluvisol eutri-háplico Sofía de Arriba; DMS = diferencia mínima significativa; A = arena; L = limo; R = arcilla.

de los suelos que se estudiaron, fue diferente para cada uno de ellos, sin detectarse ninguna tendencia con la profundidad o el tamaño de las partículas de cada una de las capas.

De acuerdo con los resultados, existió un aumento en la concentración de As del primer horizonte al segundo en la mayoría de los suelos (a excepción de Fresno del Norte) (Cuadro 2), aunque al relacionar el contenido de As con la profundidad y los diferentes tamaños de partículas, no se explica el comportamiento ( $R^2 < 0.5563$ ) de este metaloide. En cambio, cuando se relacionan estos resultados con el P disponible en cada capa, se observa una tendencia positiva, pero con un  $R^2$  menor que 0.1059; a manera de ejemplo se muestra el caso del suelo de la Concha (Figura 2). Si se considera a la solución fosfatada que se agregó al suelo, de  $200 \text{ mg L}^{-1}$ , se tiene que al reaccionar el fósforo con las partículas del suelo, el arsénico se libera de los sitios de intercambio, como lo establecen Peryea (1998), Álvarez-Benedí *et al.* (2003) y Pigna *et al.* (2010), situación que no se detecta cuando se agregó agua únicamente (testigo) donde la concentración de As fue similar a la inicial. Por ello en las primeras capas la concentración de fósforo disminuye y se incrementa el arsénico;

mientras que conforme aumenta la profundidad las concentraciones de uno y otro elemento se reducen y estabilizan por las diferentes reacciones de adsorción y desorción que se presentan (Violante y Pigna, 2002). La diferencia en el comportamiento del As a través del perfil puede deberse a la diferencia en la mineralogía de las diferentes capas que constituyen los suelos (Bissen y Frimmel, 2003). Aunque estos suelos son de origen aluvial y los horizontes tuvieron el mismo modo de formación, es necesario realizar estudios de su mineralogía para entender mejor el comportamiento de este metaloide (Smedley y Kinnibugh, 2002).

## CONCLUSIONES

La concentración de arsénico de la capa superficial de los suelos de la región Lagunera varía de  $0.64$  a  $1.23 \text{ mg kg}^{-1}$  lo que no representa un problema de contaminación por arsenicismo para los suelos agrícolas de esta región; sin embargo, la adición de fosfatos a través de fertilizantes químicos en el manejo de los cultivos, favorece la acumulación de este metaloide debido a la competencia por los sitios de intercambio que se establece entre el fósforo y el arsénico, lo cual

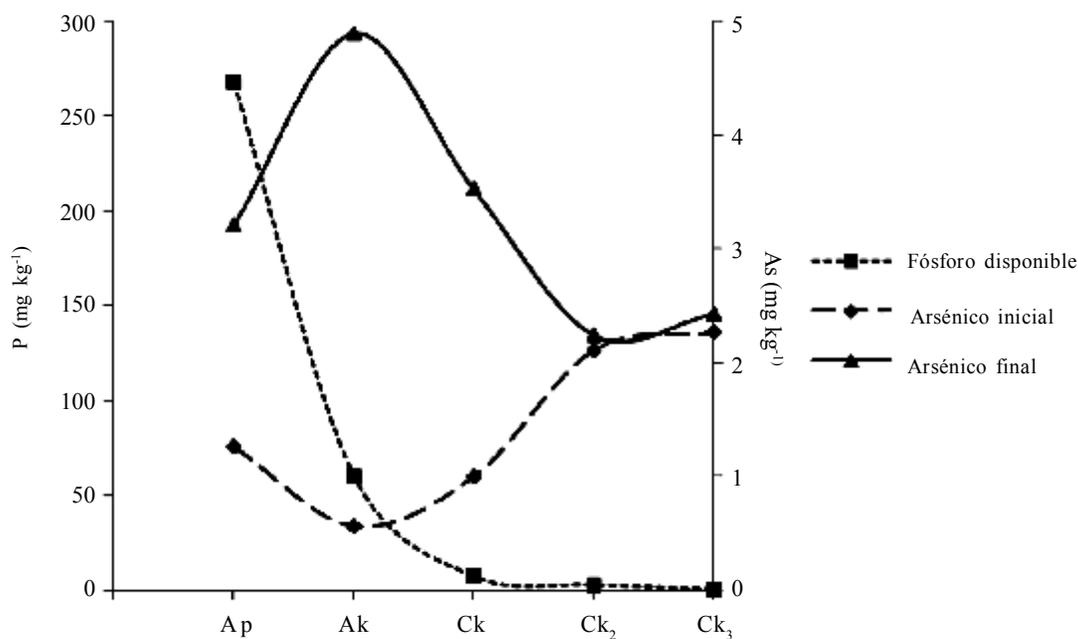


Figura 2. Relación entre arsénico disponible y el fósforo disponible en el suelo de la Concha, Coahuila.

da como resultado el incremento de la concentración de As en la solución del suelo hasta por un 662% en suelos que tienen concentraciones altas (9.8 a 22.17  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) del ión calcio como los suelos de la Concha (*Fluvisol calci-arídico*). Por otra parte, la concentración de arsénico dentro del perfil del suelo, se modifica cuando se agrega fósforo al suelo y con el manejo, al momento del riego y la aplicación constante de un fertilizante fosfatado, lo cual puede traer como consecuencia el incremento de la concentración de este metaloide. No obstante, se requiere de más investigación que relacione las diferentes clases de suelo, su origen y características mineralógicas. Así mismo, es importante resaltar que la concentración de arsénico en la capa superficial de los suelos de la región Lagunera es distinta en los suelos, por lo que es necesario establecer la distribución espacial, para un mejor entendimiento de la presencia de arsénico en los suelos de la región.

### LITERATURA CITADA

- Alam, M. G., S. Tokunaga, and F. Stagnitti. 2007. Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants. *J. Environ. Sci. Health Part A* 42: 447-451.
- Álvarez-Benedí, J., S. Bolado-Rodríguez, I. Cancillo-Carro y C. Calvo-Revuelta. 2003. Dinámica de adsorción-desorción de arsénico (v) en suelos de cultivo en Castilla y León. *Estud. Zona No Saturada Suelo* 6: 331-338.
- ARSLAND (Sustainable Management of Arsenic Contaminated Water and Soil in Rural Areas of Latin America. 2006. D09: Suitable soil remediation technologies for the target zones. <http://www.arsland.net/english/publications/D09.pdf> (Consulta: enero 13, 2013).
- Bissen, M. and F. H. Frimmel. 2003. Arsenic – a review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta Hydroch. Hydrobiol.* 31: 97-107.
- Bosso, S. T. and J. Enzweiler. 2008. Bioaccessible lead in soils, slag, and mine wastes from an abandoned mining district in Brazil. *Environ. Geochem. Health* 30: 219-229.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 1999. *The nature and properties of soil*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Castruita Ávila, L., A. M. García Lara, J. E. Camporredondo Saucedo, C. F. Sifuentes Barrera y M. Garza García. 2011. Estudio cinético de la remoción de arsénico en un reactor electroquímico tipo filtro prensa. *Prospectiva* 9: 7-12.
- De Paepe, P. 1991. *Principles of petrology*. International Training Center. Ghent Belgium.
- Ehler, L. J. and R. G. Luthy. 2003. Contaminant bioavailability in soil and sediment. *Environ. Sci. Technol.* 37: 295A-302A.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- García, J., D. P. L. Rousseau, J. Morató, E. Lesage, V. Matamoros, and J. M. Bayona. 2010. Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 40: 561-661.
- García-Salcedo, J. J., G. Olivas-Meza, M. C. Hernández-Serrano, M. F. Sanmiguel-Salazar y N. González-Díaz. 2003. Alteraciones electroneuromiográficas en pacientes con hidroarsenicismo crónico regional endémico en la Comarca Lagunera. *Rev. Mex. Med. Fis. Rehab.* 15: 75-78.
- Iliná, A., J. L. Martínez Hernández, E. P. Segura-Ceniceros, J. A. Villarreal-Sánchez y K. M. Gregorio-Jáuregui. 2009. Biosorción de arsénico en materiales derivados de maracuyá. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25: 201-216.
- IUSS Working Group WRB (Working Group World Reference Base of the International Union of Soil Sciences). 2006. World reference base for soil resources 2006. pp. 128. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO. Rome, Italy.
- Järup, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.* 68: 167-182.
- Liu, F., A. De Cristofaro, and A. Violante. 2001. Effect of pH, phosphate and oxalate on the adsorption/desorption of arsenate on/from goethite. *Soil Sci.* 166: 197-208.
- Navarro, P., C. Vargas, E. Araya, I. Martín y F.J. Alguacil. 2004. Precipitación de arsénico desde efluentes metalúrgicos. *Rev. Metal.* 40: 409-412.
- Pape, Th. and D. Lager. 1994. *Manual for soil description and classification*. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Peryea, F. J. 1998. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions. *HortScience* 33: 826-829.
- Pigna, M., V. Cozzolino, A. Giandonato-Caporale, M. L. Mora, V. Di Meo, A. A. Jara, and A. Violante. 2010. Effects of phosphorus fertilization on arsenic uptake by wheat grown in polluted soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 428-442.
- Porta C., J., M. López A. R. y C. Roquero L. 2003. *Edafología, para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Rodríguez, J. 1993. *La fertilización de los cultivos: Un método racional*. Colección de Agricultura. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- Rosas, I., R. Belmont, A. Armienta, and A. Baez. 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico. *Water Air Soil Pollut.* 112: 133-149.
- Segura-Castruita, M. A., L. Martínez-Corral, E. García-Barrientos, A. Huerta-García, J. L. García-Hernández, M. Fortis-Hernández, J.A. Orozco-Vidal, and P. Preciado-Rangel. 2012. Localization of local soil classes in an arid region of Mexico, using satellite imagery. *Int. J. Rem. Sens.* 33: 184-197.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma mexicana para análisis de laboratorio para clasificación de suelos. NOM-21-RECNAT-2000. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2007. Norma mexicana de líneas base de diferentes metales pesados y metaloides. NOM-147-SERMANAT/SSA1-2004. México, D. F.

- Smedley, P. L. and D. G. Kinniburgh. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.* 17: 517-568.
- Smith, E., R. Naidu, and A. M. Alston. 2002. Chemistry of inorganic arsenic in soils, II: Effect of phosphorus, sodium, and calcium on arsenic sorption. *J. Environ. Qual.* 31: 557-563.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Washington, DC, USA.
- Stoops, G. 2010. Micromorphology as a tool in soil and regolith studies. pp. 1-8. *In*: G. Stoops, V. Marcelino, and F. Mees (eds). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Elsevier. The Netherlands.
- Sumner, M. 2000. *Handbook of soil science*. CRC. Nueva York, NY, USA.
- Ungaro, F., F. Ragazzi, R. Cappellin, and P. Giandon. 2008. Arsenic concentration in the soils of the Brenta Plain (Northern Italy): Mapping the probability of exceeding contamination thresholds. *J. Geochem. Explor.* 96: 117-131.
- Verdonck, O. and P. Demeyer. 2004. The Influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hortic.* 644: 99-101.
- Violante, A. and M. Pigna. 2002. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1788-1796.
- Wijnhoven, S., G. van der Velde, R. S. E. W. Leuven, H. J. P. Eijsackers, and A. J. M. Smits. 2006. Metal accumulation risks in regularly flooded and non-flooded parts of floodplains of the river Rhine: Extractability and exposure through the food chain. *Chem. Ecol.* 22: 463-477.
- Zhao, F. J., J. F. Ma, A. A. Meharg, and S. P. McGrath. 2009. Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytol.* 181: 777-794.